

Efeito de bloqueio na calibração de anemómetros num túnel de vento

Daniel João Marques Almeida

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Álvaro Henrique Rodrigues

Coorientador: Eng. Miguel Marques



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho 2017

À minha família, namorada e amigos,

Resumo

Este trabalho tem como objetivo estudar o papel do efeito de bloqueio no valor da velocidade medida durante a calibração de anemômetros num túnel de vento. O conhecimento da influência desse efeito levará a uma diminuição da incerteza da medição da velocidade.

Para isso, começou-se por estudar o fenómeno do efeito de bloqueio e quais as correções para a velocidade medida já sugeridas na literatura, com especial atenção para anemômetros inseridos num túnel de vento.

Posteriormente, através da medição da força de arrasto e cálculo do coeficiente de arrasto para sete discos de diferentes diâmetros colocados perpendicularmente ao escoamento, avaliou-se o efeito de bloqueio, sendo cada um colocado no túnel de vento com uma velocidade de escoamento entre os 4 e os 16 m/s. Para realizar estes ensaios foi necessário construir uma balança aerodinâmica de raiz que medisse a força de arrasto.

Depois de realizados os ensaios dos sete discos, foram também medidas as forças de arrasto de três anemômetros de copos diferentes para a mesma gama de velocidades de escoamento, em que cada anemómetro foi ensaiado com a rotação livre dos copos e com a rotação impedida.

Finalmente, foi formulada uma correção para a velocidade dos anemômetros devido ao efeito de bloqueio quando inseridos no túnel de vento do LAC.

Ao comparar os resultados obtidos com os valores propostos pelas correções da literatura, concluiu-se que todas estas subestimavam o efeito de bloqueio. Entre as estudadas, a que ficou mais perto dos resultados obtidos foi a correção de Maskell.

Blockage effect on calibration of anemometers in a wind tunnel

Abstract

The aim of this work is to study the blockage effect on a wind tunnel and correct the measured velocity to achieve a lower uncertainty on the calibration of anemometers with different blockage ratio. For this, the blockage effect phenomenon and the corrections to the velocity that already exist in literature were studied, with special attention to the anemometers on a wind tunnel.

Afterwards, the blockage effect on discs that were perpendicular to the flow with different blockage ratio was evaluated. This was achieved by measurement of the drag force and by calculation of the drag coefficient for each disc, being every disc inserted in the wind tunnel with a flow velocity between 4 and 16 m/s. To perform these tests, building an aerodynamic balance that could measure the drag force was necessary.

After tests for the seven discs were done, the drag forces of three different cup anemometers, in the same range of flow velocity were measured. Each anemometer was tested with free rotation of the cups and with rotation impeded.

Finally, a correction for the anemometers velocity due the blockage effect when they were insert in the wind tunnel of LAC was formulated.

Comparing the results obtained with the values proposed by the corrections of literature, it was concluded that all the corrections underestimated the blockage effect. It was also noted that the closest correction of the obtained results was the Maskell's theory.

Agradecimentos

Primeiramente, quero agradecer ao professor Álvaro Rodrigues, pelas sugestões e conhecimentos transmitidos ao longo deste semestre, bem como pela ajuda indispensável na realização deste estudo.

Agradeço também ao Eng. Miguel Marques do INEGI, pela orientação, tempo despendido e dados facultados para a elaboração desta dissertação.

Ao técnico do túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica e Calibração do INEGI, Luís Mendes, incansável na ajuda prestada principalmente para a construção da balança aerodinâmica, sem a qual todo o processo teria sido bem mais complicado.

Uma palavra de agradecimento também ao professor Armando Santos pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos durante este trabalho.

Um obrigado à minha família, amigos e à Daniela pelo apoio constante e por acreditarem no meu trabalho, não só durante esta dissertação, mas durante todo o meu percurso universitário.

Um obrigado especial ao meu já falecido avô, Acácio Marques, pelo exemplo que continua a ser para mim.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do trabalho e motivação.....	1
1.2	Túnel de vento do INEGI.....	1
1.3	Importância da calibração dos anemómetros.....	2
1.4	Objetivos da dissertação	3
1.5	Metodologia de trabalho e estrutura da tese	3
2	Estado da arte da calibração de anemómetros em túnel de vento.....	5
2.1	Diferentes configurações dos túneis de vento.....	5
2.1.1	Tipos de circuitos	5
2.1.2	Tipos de secção de teste	6
2.2	Bloqueio	8
2.2.1	Definição.....	8
2.2.2	Aproximações habitualmente usadas para corpos rombos	9
2.3	Normas de calibração existentes (MEASNET).....	10
2.3.1	Túnel de vento	11
2.3.2	Processo de calibração.....	11
2.3.3	Apresentação de resultados	11
3	Medição do Efeito do Bloqueio na calibração de anemómetros.....	13
3.1	Definição Pormenorizada do Efeito do Bloqueio	13
3.1.1	Bloqueio Sólido	13
3.1.2	Bloqueio de esteira	13
3.1.3	Relação entre o bloqueio e o nível de turbulência	14
3.2	Correções do bloqueio existentes na literatura	14
3.3	Metodologia dos ensaios experimentais	18
3.3.1	Discos	20
3.3.2	Anemómetros	22
4	Balança aerodinâmica.....	25
4.1	Principais objetivos	25
4.2	Forças existentes nos ensaios no túnel de vento.....	25
4.3	Sensor/transdutor de força.....	26
4.3.1	Tipos de sensores de força	26
4.3.2	Sensor de força utilizado	27
4.4	Interferências na medição da força no túnel de vento.....	28
4.4.1	Influência do suporte.....	28
4.4.2	Influência da forma do objeto.....	31
4.4.3	Outras possíveis interferências.....	31
4.5	Solução construtiva	31
5	Resultados Experimentais.....	37
5.1	Discos	37
5.2	Anemómetros.....	43
5.3	Correção referente ao efeito de bloqueio proposta	45
6	Conclusões e perspetivas de trabalho futuro	47
	Referências.....	49
ANEXO A:	Características do túnel de vento	51
ANEXO B:	Características do sistema de aquisição	53
ANEXO C:	Calibração do equipamento	55
ANEXO D:	Análise das incertezas de medição	57

Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema de um túnel de vento de circuito aberto.....	5
Figura 2 – Esquema representativo de um túnel de vento de circuito fechado com secção de teste aberta.....	6
Figura 3 – Esquema representativo de um túnel de secção aberta e circuito aberto	7
Figura 4 – Secção de teste do túnel de vento do LAC.....	8
Figura 5 – Imagem representativa de um túnel de vento de secção de teste $\frac{3}{4}$ aberta	8
Figura 6 – Representação esquemática do efeito do bloqueio num túnel de secção fechada e num túnel de secção aberta.....	9
Figura 7 – Bloqueio de esteira provocado num disco fino perpendicular ao escoamento	14
Figura 8 – Coeficientes utilizados para a correções de Walter Wuest	16
Figura 9 – Posicionamento relativo do anemómetro a ensaiar e do tubo de Pitot.	20
Figura 10 – Representação esquemática do posicionamento dos discos face ao sentido do escoamento.	21
Figura 11 – Sete discos utilizados nos ensaios experimentais.	21
Figura 12 – Variação do coeficiente de arrasto de um disco com a variação do número de Reynolds... ..	22
Figura 13 – Anemómetros utilizados.....	22
Figura 14 - Forças e momentos aerodinâmicos.....	25
Figura 15 – Suporte vertical dos discos (de arestas vivas).	29
Figura 16 – Windshield utilizado à volta do suporte dos discos.....	29
Figura 17 - Variação do coeficiente de arrasto do “windshield” com a variação da velocidade do escoamento.....	30
Figura 18 – Gráfico da variação do CD em função da velocidade de escoamento para o disco de 6% de BR, com e sem o “windshield”.....	30
Figura 19 - Demonstração da colagem dos discos.	31
Figura 20 – Solução pensada inicialmente da balança aerodinâmica.	32
Figura 21 - Vistas frontal e lateral da balança aerodinâmica.	33
Figura 22 – Eixo de rotação da balança aerodinâmica.	33
Figura 23 – Representação da montagem da célula de carga na balança aerodinâmica.....	34
Figura 24 - Solução construtiva da balança aerodinâmica para os discos.	34
Figura 25 – Balança aerodinâmica.	35
Figura 26 - Suportes dos discos dentro da secção de teste sem o windshield e com o windshield.....	35
Figura 27 – Variação do valor do coeficiente de arrasto em função da velocidade de escoamento para os sete discos.	37
Figura 28 - Variação do valor do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds para os sete discos.	38
Figura 29 – Suporte dos discos a encostar no windshield para as velocidades mais elevadas dos maiores discos.	38
Figura 30 - Variação do CD medido em função do rácio de bloqueio.....	39
Figura 31 - Variação do CD medido em função do parâmetro de bloqueio.	40
Figura 32 - Rácio da velocidade corrigida sobre a velocidade medida em função do rácio de bloqueio.	41

Figura 33 - Rácio da velocidade corrigida sobre a velocidade medida em função do parâmetro de bloqueio.	41
Figura 34 – Comparação do rácio da velocidade corrigida sobre a velocidade medida em função do rácio de bloqueio com os valores sugeridos por diferentes autores.	42
Figura 35 - Comparação do rácio da velocidade corrigida sobre a velocidade medida em função do rácio de bloqueio com os valores sugeridos por diferentes autores.	42
Figura 36 - Variação do valor do coeficiente de arrasto em função da velocidade de escoamento para os anemómetros.	43
Figura 37 – Quociente entre a velocidade corrigida e a velocidade medida em função do parâmetro de bloqueio, segundo a relação experimental dos discos e a correção de Pankhurst e Holder.....	45
Figura A1 – Túnel de vento do LAC.....	51
Figura B1- Fotografias da célula de carga utilizada.....	54
Figura C1 – Calibração realizada com a estrutura da balança aerodinâmica na horizontal.....	55
Figura C2 – Calibração com a estrutura da balança aerodinâmica na posição de funcionamento.....	55
Figura C3 – Gráfico da calibração da célula de carga (estrutura deitada).	56
Figura C4 – Massas conhecidas utilizadas.....	56

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Valor das áreas projetadas de cada um dos anemômetros utilizados.	23
Tabela 2 - Dados relativos às dimensões do anemómetro NRG	44
Tabela 3 – Dados relativos à dimensão do anemómetro THIES	44
Tabela 4 - Dados relativos à dimensão do anemómetro VECTOR	44
Tabela A1 – Principais propriedades do túnel de vento	51
Tabela B1 – Gamas de funcionamento e incertezas do equipamento padrão do túnel do LAC	53
Tabela B2 – Principais características da célula de carga utilizada.....	53
Tabela D1 - Cálculo do valor da incerteza absoluta e incerteza relativa do CD para os discos com velocidade nominal de escoamento de 9 m/s	58
Tabela D2 - Cálculo do valor da incerteza absoluta e incerteza relativa do CD para os anemómetros com velocidade nominal de escoamento de 9 m/s	59

1 Introdução

1.1 Enquadramento do trabalho e motivação

Esta dissertação intitula-se como “O efeito de bloqueio na calibração de anemómetros num túnel de vento”. Este tema foi sugerido pelo INEGI, Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, nomeadamente pelos responsáveis do LAC, Laboratório de Aerodinâmica e Calibração, daquela instituição, com o intuito de melhorar a caracterização do escoamento, em particular a velocidade, no túnel de vento do LAC que é utilizado para a calibração de anemómetros.

A medição do efeito de bloqueio provocado pelos anemómetros dentro do túnel de vento e, a partir dos resultados obtidos, a aplicação da respetiva correção à velocidade aí medida, tem como objetivo melhorar os procedimentos de calibração de anemómetros e diminuir a incerteza dos resultados.

A calibração de anemómetros com baixa incerteza é de extrema importância sempre que estes são utilizados com o objetivo de quantificar a energia contida no vento, nomeadamente para avaliação do potencial eólico de um determinado terreno para construção de um parque eólico.

Certamente que os anemómetros também poderão ser usados para medir a velocidade do vento para outras aplicações, porém são especialmente importantes para esse efeito, pois a velocidade do vento é um dos principais fatores que determina a viabilidade ou não desses projetos.

1.2 Túnel de vento do INEGI

O INEGI foi fundado em 1986, vocacionado para a investigação, inovação e utilização de tecnologia orientada no setor industrial. Tem como missão a contribuição no desenvolvimento da indústria e da economia em geral, através da inovação de base científica e tecnológica [1].

O projeto desta dissertação foi desenvolvido na unidade CIENER, Centro de Investigação em Energias Renováveis, que está em atividade desde de Janeiro de 2015 e tem como objetivo o desenvolvimento, demonstração e divulgação das tecnologias energéticas renováveis inovadoras e prestação de serviços de consultoria nessa área, estando dividido em quatro grupos: energia solar (térmica e fotovoltaica); bioenergia (combustão e gaseificação de biomassa); energia eólica e edifícios bioclimáticos e energeticamente eficientes [2].

A atividade experimental decorreu no Laboratório de Aerodinâmica e Calibração, que é um dos laboratórios acreditados do INEGI segundo a norma NP EN ISO 17025:2005. Foi

criado no ano de 2012 com as seguintes metas: proporcionar os meios adequados à investigação da resposta de sensores de medição das características do vento; realização de ensaios em condições controladas que complementem os trabalhos de investigação realizados em condições reais e realização de ensaios experimentais de aerodinâmica industrial [3].

No túnel de vento do LAC nunca havia sido medido o efeito do bloqueio, sendo que a correção utilizada para compensar esse fator era meramente uma estimativa com base na correção efetuada noutros túneis de vento utilizados para o mesmo efeito, sem, no entanto, haver nenhuma comprovação científica de que essa correção era a adequada ao túnel em causa.

1.3 Importância da calibração dos anemómetros

Como já referido anteriormente, a tese de mestrado desenvolvida procura melhorar a calibração que é feita nos anemómetros, tentando estimar qual o efeito de bloqueio produzido pelos mesmos quando a funcionar dentro de um túnel de vento de secção fechada e circuito aberto, situação correspondente ao túnel de vento do LAC.

Embora não se espere que o efeito de bloqueio modifique de forma muito significativa a velocidade medida pelo tubo de Pitot do túnel de vento, é importante que essa correção seja feita com o objetivo de diminuir a incerteza da medição da velocidade.

A velocidade intervém de forma não linear na quantificação da potência contida no vento, equação 1.1. Assim, os desvios na sua avaliação refletem-se de forma decisiva na estimativa da energia passível de ser convertida por um aerogerador e na quantificação do potencial eólico de um local.

$$P = 0,5 \times \rho \times A \times C_p \times v^3 \quad (1.1)$$

Onde:

ρ é a massa volúmica do fluido (vento)

A é a área do círculo que delimita o comprimento das pás do aerogerador

v é velocidade do vento

C_p é o coeficiente de potência

P é a potência que advém do vento disponível para o aerogerador

A potência contida no vento varia com o cubo da sua velocidade, o que leva a que um erro na medição da velocidade de 10% possa levar a erros superiores a 30% na potência. Se tivermos em conta que o investimento na construção de um parque eólico é feito à cabeça e necessita de um capital intensivo, a incorreta medição da velocidade do vento durante a fase de prospeção de terrenos pode levar a que a decisão de avançar ou não com o projeto não seja a mais adequada economicamente.

Por estas razões, os túneis de vento como o do LAC, utilizados para a calibração de anemómetros, têm de respeitar certas normas para diminuir a incerteza e uniformizar também as medições nos diferentes túneis acreditados.

O túnel do LAC é acreditado pelo IPAC, Instituto Português de Acreditação (características do túnel do LAC no anexo A). Apesar disso, há o objetivo de este túnel de vento vir a ser certificado pela MEASNET, sendo que a realização deste trabalho, ao tentar aferir o efeito de bloqueio na medição da velocidade, pode ser um passo importante para o alcançar.

1.4 Objetivos da dissertação

Para este trabalho foram definidos os seguintes objetivos:

- Estudo e compreensão do que é o efeito de bloqueio em túneis de vento;
- Caracterização do efeito de bloqueio na medição da velocidade de escoamento, no interior do túnel de vento do LAC, nas operações de calibração de anemômetros de copos;
- Elaboração de propostas de correção do valor da velocidade do escoamento devido ao efeito do bloqueio.

1.5 Metodologia de trabalho e estrutura da tese

Com vista a atingir os objetivos propostos foi desenvolvido um plano de trabalhos.

Primeiramente, foram consultadas diversas fontes de informação (artigos científicos, livros, teses, etc.) de modo a: compreender exaustivamente em que consiste o efeito de bloqueio; perceber o fenómeno da calibração dos anemômetros em túneis de vento e as suas especificações; conhecer o que já é feito para corrigir o efeito de bloqueio em alguns túneis de vento e quais os métodos possíveis de seguir para poder quantificá-lo.

Depois de cumprida esta fase foram identificados três métodos para calcular o efeito de bloqueio:

- Através da medição da força de arrasto [4];
- Através da medição da variação da pressão ao longo do túnel de vento [5];
- Através da variação do valor da velocidade de escoamento medida diretamente pelos anemômetros, resultante da variação do tamanho dos mesmos [6].

O método escolhido foi o da medição da força de arrasto. Para tal, foi necessário projetar e construir uma balança aerodinâmica que medisse o arrasto e implementá-la no túnel de vento.

Seguidamente, decidiu-se pôr o método à prova através da medição da força de arrasto de discos de diferentes tamanhos colocados no túnel, variando a velocidade de escoamento e comparando o valor dos coeficientes de arrasto calculados com os valores esperados da literatura.

Por último, foi medido o arrasto em anemômetros com os copos presos (em que é impedida a sua rotação) e em anemômetros não presos e proposta a correção da velocidade medida.

No capítulo 2 será exposto o estado da arte relativo à calibração de anemômetros, nomeadamente as diferentes configurações de túneis de vento existentes, bem como a explicação do que é o fenómeno de bloqueio e referência de normas de calibração, nomeadamente da MEASNET.

No capítulo 3 será detalhado com maior pormenor em que consiste o efeito de bloqueio, serão referidas quais as correções existentes na literatura para o mesmo e detalhado o procedimento experimental que irá ser seguido.

No capítulo 4 vai ser apresentada e explicada a solução construtiva da balança aerodinâmica para medir a força de arrasto.

No capítulo 5 vão ser relatados os resultados obtidos nos ensaios tanto dos discos como dos anemômetros e proposta a equação de correção da velocidade medida.

Por último, serão referidas as conclusões retiradas e mencionadas perspectivas de trabalhos futuros que complementem o estudo efetuado nesta dissertação.

2 Estado da arte da calibração de anemômetros em túnel de vento

2.1 Diferentes configurações dos túneis de vento

Existe uma enorme variedade de configurações de túneis de vento. No entanto, é possível classificar a grande maioria destes seguindo dois critérios:

- Tipo de circuito (aberto ou fechado);
- Tipo de secção de teste (aberta, fechada ou parcialmente aberta).

2.1.1 Tipos de circuitos

Circuito Aberto

Os túneis de vento denominados de circuito aberto têm secções de entrada e saída do ar que são abertas para o exterior, ou seja, o ar que sai do túnel de vento não reentra no mesmo, contrariamente aos de circuito fechado.

A configuração de um túnel de vento de circuito aberto é a que se observa na Figura 1.

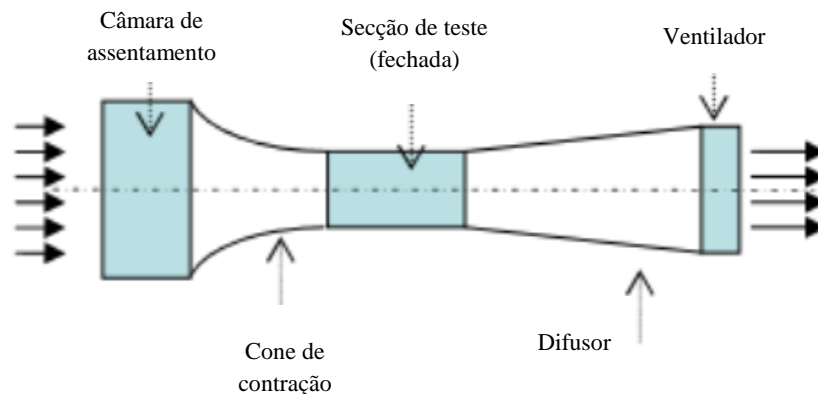


Figura 1 – Esquema de um túnel de vento de circuito aberto [4].

As principais vantagens são:

- Baixo custo inicial;
- Permite a realização de “testes sujos” (com areia, neve, motores de combustão ou uso de fumo para visualização do escoamento) sem grandes inconvenientes;
- Maior facilidade de limpeza do túnel.

Por outro lado, este tipo de configuração conduz a maiores perdas de pressão, o que leva a maiores consumos de energia relativamente aos túneis de circuito fechado que tenham as mesmas características de escoamento e o mesmo tamanho da secção de teste.

Os túneis de circuito aberto são utilizados essencialmente para efeitos educacionais, dado que o seu uso não é muito intensivo e as secções de teste são relativamente pequenas. Porém, alguns dos maiores túneis do mundo são também de circuito aberto.

Circuito Fechado

Os túneis de circuito fechado são mais eficientes energeticamente e, por essa razão, são normalmente a escolha quando construídos com o intuito de serem utilizados frequentemente, quando o isolamento relativo ao meio ambiente é fundamental ou quando há preocupações relativas à emissão de ruído.

Por outro lado, além do custo inicial maior, este tipo de túnel implica também considerações adicionais como a temperatura que é atingida dentro da infraestrutura, sendo que alguns utilizam um sistema de arrefecimento.

A configuração deste tipo de túnel pode ser observada na Figura 2.

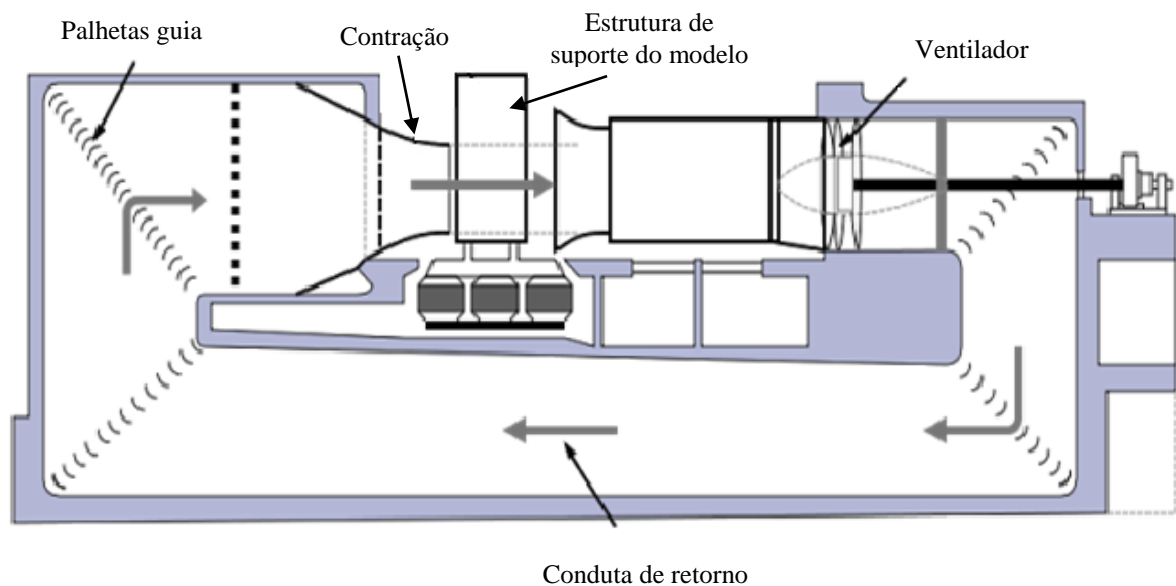


Figura 2 – Esquema representativo de um túnel de vento de circuito fechado com secção de teste aberta [7].

2.1.2 Tipos de secção de teste

Secção de teste aberta

A principal vantagem de uso de uma secção de teste aberta é a facilidade de acesso ao objeto modelo do ensaio.

No entanto, com este tipo de configuração, a qualidade do escoamento torna-se mais dependente das condições ambientes e o nível de ruído provocado pode ser elevado.

Se o túnel for usado para a calibração de anemómetros, é de salientar que se a secção de teste for aberta o escoamento não vai ser tão estável como se a secção fosse fechada, podendo até haver variação do caudal mássico de ar. É, por isso, importante fazer uma análise detalhada e as correções necessárias para que a velocidade e outros parâmetros sejam bem medidos.

Como é possível observar na Figura 3, é muitas vezes usado neste tipo de soluções uma câmara de pressão com o objetivo de impedir a fuga de ar.

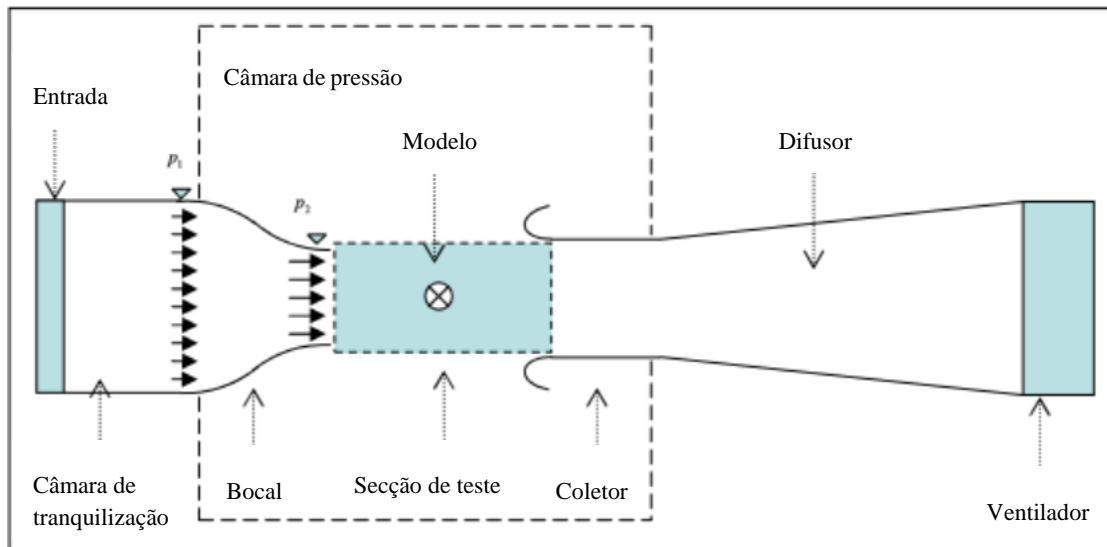


Figura 3 – Esquema representativo de um túnel de secção aberta e circuito aberto [4].

Secção de teste fechada

Os túneis de vento de secção de teste fechada têm a vantagem do escoamento nesta zona do túnel de vento ser independente (pelo menos diretamente) das condições do meio circundante, o que leva a menores índices de turbulência.

Para além disso, o facto de ser fechada impede a divergência do fluido para fora do cone difusor, não necessitando da câmara de pressão, o que se traduz em menos perdas de pressão e, consequentemente, maior eficiência do processo, permitindo assim atingir velocidades de escoamento mais elevadas, para uma dada potência do ventilador.

Nesta configuração, os túneis permitem, de uma forma geral, a realização de ensaios com velocidades mais elevadas, o que possibilita alcançar maiores números de Reynolds e conseguir condições de escoamento com menor influência dos efeitos viscosos.

Este tipo de formato é o mais comum, sendo que o túnel de vento utilizado para o trabalho experimental desta dissertação é também de secção fechada (foto na Figura 4).

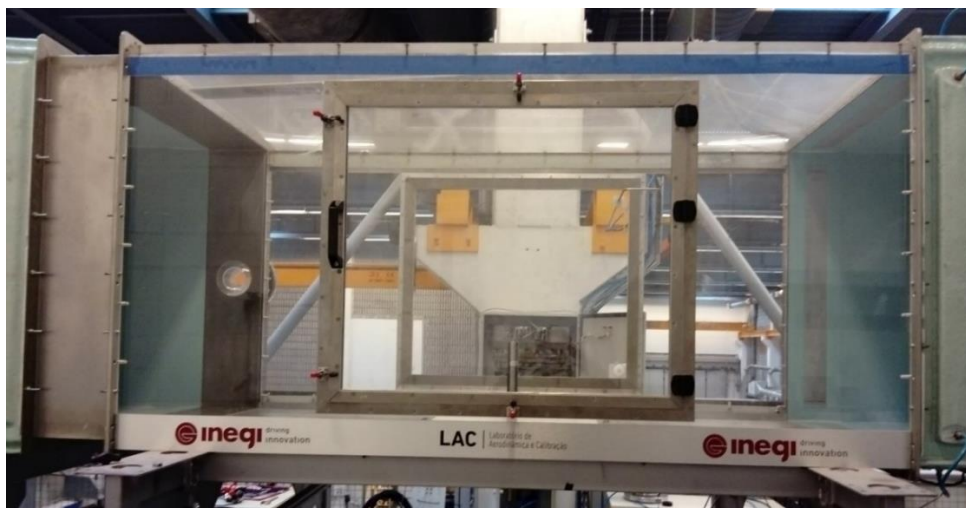


Figura 4 – Secção de teste do túnel de vento do LAC.

Outras configurações

Há ainda outras configurações possíveis para a secção de teste de túneis de vento, sendo que a mais comum é a secção $\frac{3}{4}$ aberta (tem apenas a base física da secção de teste) que é muito utilizada para testes na indústria automóvel de que é exemplo a Figura 5.



Figura 5 – Imagem representativa de um túnel de vento de secção de teste $\frac{3}{4}$ aberta [8].

Há ainda secções de teste ventiladas ou com paredes ranhuradas de modo a diminuir as correções necessárias.

Finalmente, podem mencionar-se as secções de trabalho com paredes adaptáveis, em que a área da secção reta varia, como forma de introduzir ou compensar gradientes longitudinais de pressão [4].

2.2 Bloqueio

2.2.1 Definição

O efeito de bloqueio é, por definição, o efeito que a obstrução de um objeto tem no escoamento de um fluido quando este está confinado por paredes, gradientes de pressão ou por

outro qualquer objeto/fenómeno. Naturalmente, o efeito de bloqueio vai ser diferente caso a secção de teste seja aberta ou fechada.

Se a secção for fechada, com a obstrução provocada pelo objeto colocado na secção de teste, há a redução de secção transversal de passagem do escoamento. Isto implica que, devido à conservação do caudal mássico, a velocidade do escoamento aumente ao contornar esse objeto, como é possível observar no lado esquerdo da Figura 6.

Por outro lado, num túnel de secção aberta, o escoamento é obrigado a contornar o obstáculo, afastando-se as linhas de corrente, o que pode levar à desaceleração ou aceleração do escoamento na vizinhança do objeto, dependendo das configurações tanto do objeto como da secção de teste (lado direito da Figura 6) [4].

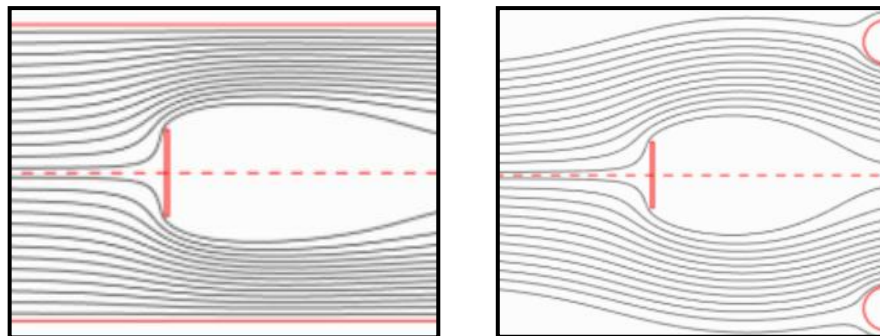


Figura 6 – Representação esquemática do efeito do bloqueio num túnel de secção fechada (lado esquerdo da figura) e num túnel de secção aberta (lado direito da figura) [4].

Em ambos os casos, se o objeto em questão for um corpo sólido rombo (“*bluff body*”) há a separação do escoamento, dando origem ao efeito de esteira a jusante do objeto, onde o regime de escoamento costuma ser turbulento, com aparição de vórtices e com evolução pouco previsível. Deste padrão de escoamento resulta, regra geral, uma forte contribuição da diferença de pressões para o arrasto experimentado pelo objeto.

Essa esteira só não surge em corpos esbeltos em linha com o escoamento (“*streamlined bodies*”), em que o escoamento consegue contornar o objeto sem que ocorra essa separação, sendo, ao contrário dos *bluff bodies*, as forças viscosas dominantes face às forças de pressão [9].

Como vai ser explicado com mais detalhe na secção 3.1 do presente documento, nos túneis de vento o efeito de bloqueio pode ser dividido em duas componentes:

- Bloqueio sólido;
- Bloqueio de esteira.

Para túneis de secção de teste aberta, para além dos bloqueios anteriores, ainda há mais dois tipos de bloqueio:

- Bloqueio na saída do escoamento da contração do túnel de vento;
- Bloqueio na entrada do coletor [4].

2.2.2 Aproximações habitualmente usadas para corpos rombos

Como referido no ponto anterior (2.2.1), a evolução do escoamento vai ser distinta conforme o objeto colocado na secção de teste seja um corpo rombo ou um corpo esbelto em

linha com o escoamento. Dado que o presente trabalho se destina a medir o efeito de bloqueio na calibração de anemómetros, é sobre a evolução do escoamento do primeiro caso que este relatório se irá centrar.

Em resultado da pesquisa bibliográfica efetuada, constatou-se que são utilizadas diferentes correções para ter em conta o efeito de bloqueio dentro de túneis de vento, sendo que para uma determinada velocidade de escoamento, conforme se utiliza uma ou outra correção, o valor da velocidade corrigida pode variar muito significativamente.

Um dos parâmetros que é muitas vezes usado nessas correções é o Rácio de Bloqueio que é definido pela equação 2.1.

$$BR = \frac{S}{C} \times 100 [\%] \quad (2.1)$$

Onde:

BR é o rácio de bloqueio

S é a área projetada do objeto colocado na secção de teste

C é a área transversal da secção de teste

Porém, investigações experimentais que ocorreram nos últimos vinte e cinco anos mostram que correções baseadas apenas no rácio de bloqueio nem sempre são as mais adequadas, pois o bloqueio depende de outros fatores, nomeadamente do coeficiente de arrasto.

Surge, então, um outro parâmetro, denominado Parâmetro de Bloqueio, que é também relevante e usado em algumas correções [4]:

$$BR.C_D = \frac{S}{C} \times C_D [-] \quad (2.2)$$

Onde:

$BR.C_D$ é o parâmetro de bloqueio

C_D é o coeficiente de arrasto (ver equação 3.13)

Umas das teorias usadas em muitos túneis de calibração de anemómetros para compensar o efeito de bloqueio é a *Teoria de Maskell*, teoria essa válida para corpos robustos utilizados em túneis de vento, ficando a dúvida se é correto aplicá-la em anemómetros devido à sua rotação.

A *Teoria de Maskell* será exposta no ponto 3.2 deste relatório, assim como outras teorias que vão ser testadas com o trabalho experimental [10, 11].

2.3 Normas de calibração existentes (MEASNET)

Como já referenciado na secção 1.2, o túnel de vento utilizado para a calibração de anemómetros, onde irão ser realizados os ensaios experimentais com o objetivo de avaliar o efeito de bloqueio, é certificado para a o procedimento de calibração de anemómetros pelo IPAC, mas que pretende ser também certificado pela MEASNET.

A MEASNET é uma associação de empresas e instituições do setor da energia eólica que pretendem assegurar medições da velocidade do vento rigorosas, com interpretações e padrões dos resultados uniformes, de modo a permitir a sua comparação. Todos os membros da MEASNET devem ser acreditados pela norma ISO/IEC 17025 [12].

O “Reference Measurement Procedure” em que é baseado o procedimento de medição da MEASNET é o IEC 61400-12-1:2005(E) “Wind turbines – Part 12-1: Power performance

measurements of electricity wind turbines, First edition 2005-12/Annex F “Cup anemometer calibration procedure”.

Para além do procedimento de medição referido, existem outros requisitos da MEASNET que têm de ser seguidos, nomeadamente:

- Requisitos relativos ao túnel de vento;
- Requisitos do processo de calibração;
- Requisitos ao nível da apresentação de resultados.

2.3.1 Túnel de vento

Relativamente aos requisitos inerentes ao túnel de vento são tidas em conta a interferência do anemómetro no escoamento e a intensidade da turbulência dentro da secção de teste.

Quanto ao primeiro parâmetro, é averiguada a interferência do anemómetro através de medições do escoamento na posição de referência do mesmo, com e sem o anemómetro, de modo a que esse fator possa ser calibrado e aplicada a correção necessária, se for caso disso. Essas medições podem ser efetuadas utilizando dois tubos de Pitot, ou por outros métodos, como, por exemplo, recorrendo à utilização de anemómetros de fio quente.

Quanto à intensidade da turbulência do escoamento deve ser inferior a 2% para intervalos de tempo até 1 minuto e componentes de turbulência superior a 10 Hz devem ser desconsiderados.

2.3.2 Processo de calibração

O método proposto pela MEASNET para calibrar a velocidade do escoamento medida é independente do tipo de anemómetro em causa. No entanto, anemómetros de outro tipo que não de copos (anemómetros sónicos, óticos, etc.) devem ter em conta a calibração segundo outros parâmetros característicos do seu funcionamento, como a sensibilidade direcional, efeitos de temperatura, etc..

2.3.3 Apresentação de resultados

Na apresentação dos resultados das calibrações é fundamental a quantificação da incerteza das medições, sendo que devem ser efetuadas segundo o “Reference Measurement Procedure” da MEASNET.

No entanto, a incerteza das medições pode ser calculada ou apresentada por outro método, desde que o método seguido seja recomendado por órgãos de acreditação e o resultado da incerteza seja melhor, ou pelo menos igual, ao valor estimado pelo “Reference Measurement Procedure” [13].

3 Medição do Efeito do Bloqueio na calibração de anemômetros

3.1 Definição Pormenorizada do Efeito do Bloqueio

Como referido na secção 2.2 do presente relatório, o efeito de bloqueio pode ser dividido em dois tipos: bloqueio sólido e bloqueio de esteira, que irão ser explanados nas secções seguintes.

Contudo, é conveniente primeiro referir que estes dois tipos de bloqueio não são completamente independentes um do outro, na medida em que ambos influenciam as condições de escoamento, o que faz com que o bloqueio sólido afete indiretamente o bloqueio de esteira e vice-versa. A origem dos dois tipos de bloqueio é que é totalmente distinta.

3.1.1 Bloqueio Sólido

O bloqueio sólido diz respeito ao constrangimento geométrico/físico provocado pelo objeto no escoamento. É estimado pelo valor do rácio de bloqueio, que é o quociente entre a área projetada do objeto num plano normal ao da direção principal do escoamento e a área transversal da secção do túnel, como indicado na equação 2.1. Esse valor é uma estimativa que serve como referência pois, no caso de secções de teste fechadas, pode haver lugar a correções se for considerada a camada limite provocada pelas paredes do túnel.

Num túnel de secção fechada como o do LAC, as condições fronteira do bloqueio sólido não variam substancialmente antes e depois da secção de teste. Deste modo, as correções de bloqueio sólido teóricas são habitualmente lineares em relação ao rácio de bloqueio, sendo que testes experimentais já efetuados validam essas correções para corpos rígidos que são usualmente aplicadas.

Já no caso dos túneis de secção aberta é mais difícil utilizar a equação 2.1 para estimar o bloqueio sólido, pois não há limite da área do túnel, o que leva à existência de variadas correções por parte de diferentes autores.

3.1.2 Bloqueio de esteira

A esteira a jusante do objeto é uma zona de baixa velocidade em que a corrente principal não consegue penetrar, ou seja, a esteira obstrui o escoamento de modo análogo ao que faz o objeto colocado no túnel no bloqueio sólido.

Tal como no caso do bloqueio sólido, o constrangimento causado ao escoamento obriga-o, no caso dos túneis de secção fechada, a aumentar a sua velocidade devido à conservação do caudal mássico.

O caso típico de bloqueio de esteira “puro” é o de um disco fino perpendicular ao escoamento como apresentado na Figura 7. A geometria em causa provoca o descolamento do escoamento de modo praticamente independente do número de Reynolds, originando uma esteira pronunciada que domina o padrão do escoamento.

Por outro lado, os objetos esbeltos, em linha com o escoamento, sofrem um bloqueio de esteira reduzido, sendo o seu efeito de bloqueio maioritariamente sólido.

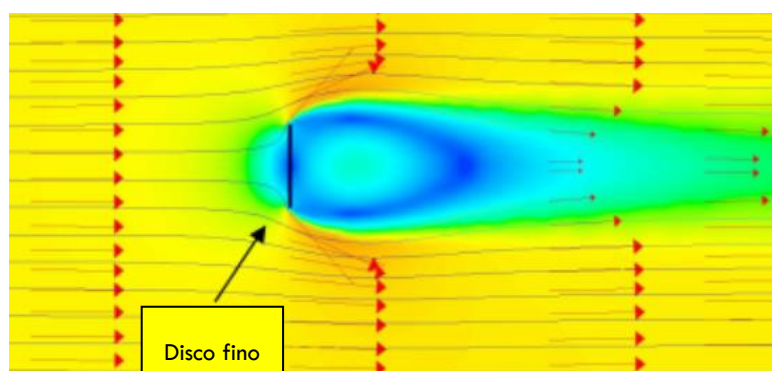


Figura 7 – Bloqueio de esteira provocado num disco fino perpendicular ao escoamento [4].

O efeito de bloqueio de esteira é proporcional ao tamanho da esteira e associado à força de arrasto que atua no objeto.

Tal como no bloqueio sólido, as correções para este tipo de bloqueio são mais simples de obter para secções fechadas do que para secções abertas, porque estas últimas não apresentam fronteiras rígidas para o escoamento [4].

3.1.3 Relação entre o bloqueio e o nível de turbulência

Os níveis de turbulência do túnel de vento do LAC foram anteriormente avaliados, obtendo-se valores muito baixos (inferiores a 1% - anexo A). Logo, é de esperar que ao longo dos ensaios esse fator seja desprezável para o estudo em causa, não tendo, por isso, sido avaliada a contribuição do mesmo no efeito de bloqueio.

3.2 Correções do bloqueio existentes na literatura

Como referido na secção 2.2.2, uma das correções mais utilizadas para a calibração de anemómetros em túneis de vento é baseada na *Teoria de Maskell*. No entanto, há mais correções referentes às variações de velocidade, pressão ou coeficiente de arrasto, provocadas pelo fenómeno em estudo, referidas em diferentes literaturas que são aplicadas em alguns túneis de vento e que vão ser mencionadas na presente secção do relatório.

Maskell:

A correção proposta por Maskell aplicável para corpos robustos e perfis alares, na presença de descolamento aerodinâmico, é:

$$\frac{\Delta q}{q} = \varepsilon * C_D * \frac{S}{C} \quad (3.1)$$

Onde:

- q é a pressão *dinâmica*
- Δq é a variação da pressão *dinâmica*
- ε é o fator de bloqueio empírico
- C_D é o coeficiente de arrasto
- S é a área projetada do objeto
- C é a área transversal da secção de teste

O fator de bloqueio empírico ε toma o valor de $5/2 \pm 1/4$ para corpos com coeficiente de forma entre 1 a 10 [4, 11].

Em termos de correção da velocidade medida a equação 3.1 é equivalente a:

$$\frac{V_c}{V} = \left(\varepsilon * C_D \frac{S}{C} + 1 \right)^{0,5} \quad (3.2)$$

Onde:

- V é a velocidade do escoamento medida
- V_c é a velocidade do escoamento já corrigida

Melbourne:

Utiliza uma fórmula idêntica à equação 3.1 de *Maskell*. No entanto chegou, experimentalmente, ao valor de $\varepsilon = 2,52$ para o caso de discos circulares com um chanfro de 45° , propondo a fórmula da equação 3.3 para corrigir o arrasto medido.

$$C_{D_c} = C_D - K C_D \frac{S}{C} \quad (3.3)$$

Onde:

- C_D é o Coeficiente de arrasto medido
- C_{D_c} é o coeficiente de arrasto corrigido
- K é uma constante do objeto
- S é a área projetada do objeto
- C é a área transversal da secção de teste do túnel

Em termos de velocidades, a equação 3.3 transforma-se na equação 3.4.

$$\frac{V_c}{V} = \left(\frac{K}{C_{D_c}} C_D \frac{S}{C} + 1 \right)^{0,5} \quad (3.4)$$

Sendo que o valor de K é igual a 1,8 para pratos quadrados segundo os resultados experimentais de *Melbourne* [4].

Walter Wuest:

Esta outra correção rege-se pela equação 3.5.

$$\frac{\Delta V}{V} = \tau \lambda \left(\frac{S}{C} \right)^{1,5} \quad (3.5)$$

Onde:

- τ é o coeficiente de bloqueio específico da secção de teste
- λ é o coeficiente específico do objeto (relativo à sua forma)
- ΔV é a variação da velocidade do escoamento

Os valores de τ e λ podem ser obtidos dos gráficos da Figura 8 [4].

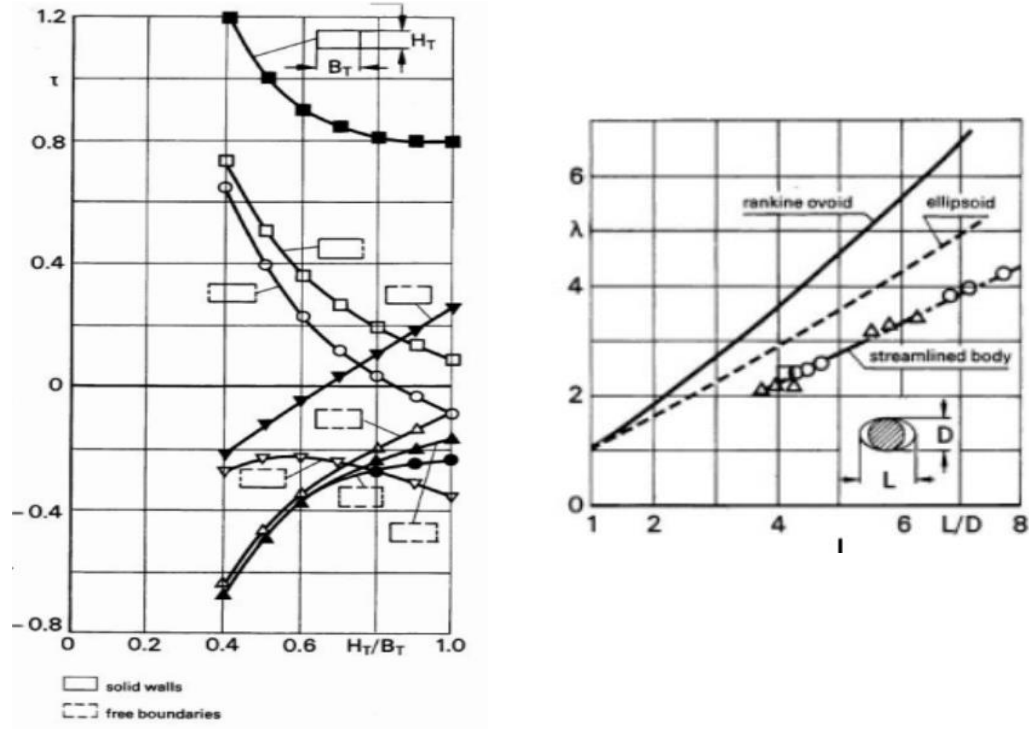


Figura 8 – Coeficientes utilizados para a correções de *Walter Wuest* (à esquerda coeficiente de bloqueio específico da secção de teste e à direita coeficiente específico do objeto).

Mercker e Widemann:

As correções de *Mercker e Widemann*, em termos da pressão dinâmica e do coeficiente de arrasto, são as equações 3.6 e 3.7, respetivamente.

$$\frac{q_c}{q_\infty} = (1 + \varepsilon_s + \varepsilon_n + \varepsilon_c)^2 \quad (3.6)$$

Onde:

- q_c é a pressão dinâmica corrigida
- q_∞ é a pressão dinâmica do escoamento não perturbado
- ε_s é o fator de bloqueio sólido
- ε_n é o fator de bloqueio na garganta do túnel
- ε_c é o fator de bloqueio na entrada para o coletor

$$C_{D_c} = \frac{C_D + \Delta C_D}{\frac{q_c}{q_\infty}} \quad (3.7)$$

Onde:

- q_c é a pressão dinâmica corrigida
- q_∞ é a pressão dinâmica do escoamento não perturbado
- C_D é o coeficiente de arrasto medido

Os parâmetros ε_s , ε_n , ε_c e ΔC_D dependem dos seguintes fatores:

- Dimensões do objeto, da secção de teste, da garganta e do coletor;
- Posição relativa do objeto em relação aos restantes elementos constituintes do túnel de vento;
- Gradientes de pressão estática na garganta e no coletor do túnel de vento;
- Coeficiente de bloqueio específico da secção de teste: τ (igual ao usado na correção de Walter Wuest).

Apesar de serem conhecidos os fatores de que dependem estes parâmetros, não foi possível averiguar como é que cada um é determinado, o que impossibilitou a utilização desta correção para comparação com os resultados experimentais obtidos. No entanto, esta correção adequa-se mais para túneis de vento de secções de teste aberta e, como o túnel de vento do LAC é de secção de teste fechada, poderia não ser a correção mais recomendável [4].

Pankhurst e Holder:

A correção proposta por *Pankhurst e Holder* assenta na equação 3.8.

$$V_c = V_m(1 + \varepsilon) \quad (3.8)$$

O fator de bloqueio (ε) é a soma do fator de bloqueio sólido com o bloqueio de esteira (equação 3.9) e estes dois parâmetros são calculados pelas equações 3.10 e 3.11, respetivamente.

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_w \quad (3.9)$$

Onde:

- ε é o fator de bloqueio
- ε_s é fator de bloqueio sólido
- ε_w é o fator de bloqueio da esteira

$$\varepsilon_s = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{0,5} \times \tau \left(1 + 0,4 \frac{t}{c}\right) \times \frac{V}{c^{1,5}} \quad (3.10)$$

Onde:

- τ é um fator geométrico (≈ 1)
- t é a espessura
- c é a corda
- V é o volume do objeto

$$\varepsilon_w = 0,25 \times \frac{S}{c} \times C_D \quad (3.11)$$

Os parâmetros referidos na equação 3.10 para cálculo do fator de bloqueio sólido para o anemómetro são medidos dividindo os anemómetros em quatro volumes cilíndricos que aproximam a forma do objeto:

- Um cilindro que cobre o volume dos copos;
- Um cilindro que representa o veio entre os copos e o corpo do anemómetro;
- Um cilindro que é o volume do corpo do anemómetro;
- Um cilindro que coincide com o suporte cilíndrico do anemómetro até à base do túnel de vento.

Sendo t substituído pelo valor da altura de cada cilindro e c o diâmetro dos mesmos.

O fator de bloqueio sólido é, então, dado pela soma dos fatores sólidos dos quatro volumes cilíndricos considerados [14].

Barlow, Rae and Pope:

A correção proposta por estes autores é simplesmente [4]:

$$\frac{\Delta V}{V} = 0,25 * \frac{S}{C} \quad (3.12)$$

Estas correções vão ser utilizadas como comparação dos resultados experimentais obtidos.

3.3 Metodologia dos ensaios experimentais

Como referido na secção 1.5, o método utilizado para medir o bloqueio recorre ao coeficiente de arrasto, tendo sido escolhido devido às seguintes características deste parâmetro:

- Dependência em relação à velocidade de escoamento;
- Curvas dos testes experimentais de fácil compreensão e exposição do fenómeno;
- Testes com a força de arrasto muito comuns em túneis de vento, nomeadamente na indústria automóvel e na indústria aeronáutica;
- É um dos parâmetros fundamentais nas correções do bloqueio encontradas na literatura.

Foram realizados dois tipos de ensaios:

1. Medição da força de arrasto em sete discos finos de diferentes diâmetros e chanfrados no bordo, variando a velocidade do escoamento;
2. Medição da força de arrasto em três anemómetros diferentes, sendo que cada um foi testado, tanto com os copos parados como permitindo a sua rotação.

As particularidades destes dois tipos de ensaios serão expostas na secção 3.3.1 e 3.3.2, respetivamente.

Não existia no LAC, até ao início dos trabalhos desta dissertação, qualquer aparelho ou método capaz de medir a força de arrasto, o que obrigou a que fosse criada uma balança de medição aerodinâmica de raiz, cujo projeto está explicado na secção 4 deste relatório.

Para cada ensaio, o valor de velocidade imposto ao ventilador do túnel de vento foi primeiramente crescente (velocidades pares) e depois decrescente (velocidades ímpares):

$$4 \rightarrow 6 \rightarrow 8 \rightarrow 10 \rightarrow 12 \rightarrow 14 \rightarrow 16 \rightarrow 15 \rightarrow 13 \rightarrow 11 \rightarrow 9 \rightarrow 7 \rightarrow 5 \text{ [m/s]}$$

Para cada patamar de velocidade a célula de carga executou 3 medições da força de arrasto, cada uma destas correspondente ao valor médio de 300 medições efetuadas, sendo que, por sua vez, cada um destes 300 valores corresponde à média de 10 medições, obtidas com uma frequência de aquisição de 10 valores por segundo.

Os valores do desvio padrão, valor máximo e valor mínimo de cada um dos 300 resultados foram também registados, o que permite averiguar se houve medições influenciadas por vibrações ou outros fatores indesejados.

Para cada patamar de velocidade foram ainda medidas:

- A velocidade do escoamento no interior do túnel por um tubo de Pitot e por tomadas de pressão localizadas entre a área maior e menor do cone de contração;
- A humidade do laboratório e do túnel de vento;
- A temperatura no laboratório e do túnel de vento;
- A pressão dentro do túnel de vento.

Cada uma dessas medições foi efetuada de modo análogo ao referido para a medição da força de arrasto, ou seja, com a mesma frequência de aquisição.

Quanto à medição de velocidades pelo tubo de Pitot, de referir que cada valor foi alcançado por dois transdutores, um de baixa pressão e um de alta pressão. Dos três meios para medir a velocidade do escoamento do interior do túnel de vento (os dois transdutores do tubo de Pitot mais as tomadas de pressão no cone de contração) o único que foi utilizado para os cálculos foram os valores do transdutor de baixa pressão do tubo de Pitot, pois é o mais preciso.

Foram também medidos todos os parâmetros já referidos com o ventilador desligado, antes e no fim de cada ensaio, servindo os valores iniciais como o “zero” das medições e a comparação desse valor com o final permite avaliar a qualidade das medições efetuadas.

Depois de obtidos os valores médios da força de arrasto para cada patamar de velocidade, foi calculado o valor do coeficiente de arrasto pela equação:

$$C_D = \frac{D}{0,5 \times \rho \times v^2 \times S} \quad (3.13)$$

Onde:

D é a força de arrasto

C_D é o coeficiente de arrasto

ρ é a massa volúmica do ar

v é a velocidade do escoamento

S é a área projetada do objeto

Os valores da massa volúmica do ar foram calculados pela equação 3.14.

$$\rho = \frac{1}{T} \left[\frac{P}{R_d} - \left(\frac{\phi}{100} \left(2,05 * 10^{-5} * e^{0,0631846 * T} * \left(\frac{1}{R_d} - \frac{1}{R_v} \right) \right) \right) \right] \quad (3.14)$$

Onde:

T é a temperatura dentro do túnel de vento

P é a pressão dentro do túnel de vento

R_d é a constante específica do ar seco

R_v é a constante específica do vapor de água

ϕ é a humidade relativa (em percentagem) dentro do túnel de vento

Já o valor da velocidade utilizado nos cálculos correspondeu ao produto do valor médio final medido pelo transdutor de baixa pressão do tubo de Pitot por 1.0033. Esse valor advém do efeito de camada limite que as 4 paredes do túnel de vento têm no escoamento e do tubo de Pitot se encontrar numa posição diferente da posição dos discos/anemómetros, tanto ao nível de cota como longitudinalmente (Figura 9).

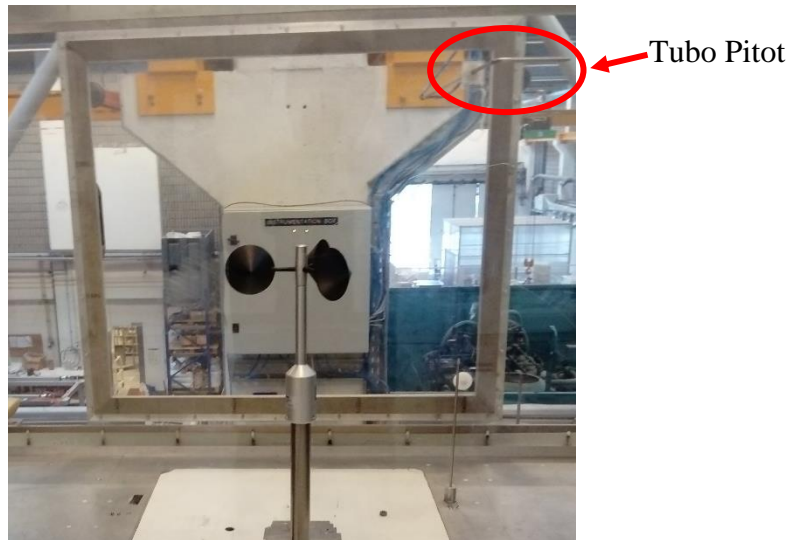


Figura 9 – Posicionamento relativo do anemómetro a ensaiar e do tubo de Pitot.

3.3.1 Discos

Foram utilizados 7 discos de PVC com 3mm de espessura e com um chanfro de 45° na face a jusante do escoamento (Figura 10) de modo a forçar a separação do escoamento mais precocemente, diminuindo a influência do número de Reynolds no valor do coeficiente de arrasto.

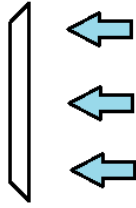


Figura 10 – Representação esquemática do posicionamento dos discos face ao sentido do escoamento.

Apesar de terem a mesma espessura, cada um dos discos tinha diferentes diâmetros, de modo a obter os rácios de bloqueio pretendidos de 1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 16% (Figura 11) seguindo a metodologia da referência bibliográfica [4].



Figura 11 – Sete discos utilizados nos ensaios experimentais.

Os discos foram posicionados a meio da secção de teste do túnel de vento, fazendo variar a velocidade de escoamento entre os 4 e os 16 m/s e medindo a força de arrasto.

Depois de obtidas as curvas dos gráficos dos coeficientes de arrasto em função do rácio de bloqueio, foi efetuada a extrapolação de modo a obter o C_{D0} , que corresponde ao valor teórico do coeficiente de arrasto caso não houvesse efeito de bloqueio.

A extrapolação é justificada porque, quando colocados discos circulares num escoamento uniforme, o coeficiente de arrasto é constante para valores de Reynolds superiores a 5×10^3 , como mostra o gráfico da Figura 12. Mantendo o número de Reynolds superior a este valor, os coeficientes de arrasto de bloqueio nulo (C_{D0}) obtidos deverão ser idênticos e independentes do tamanho do disco ou da configuração do túnel de vento.

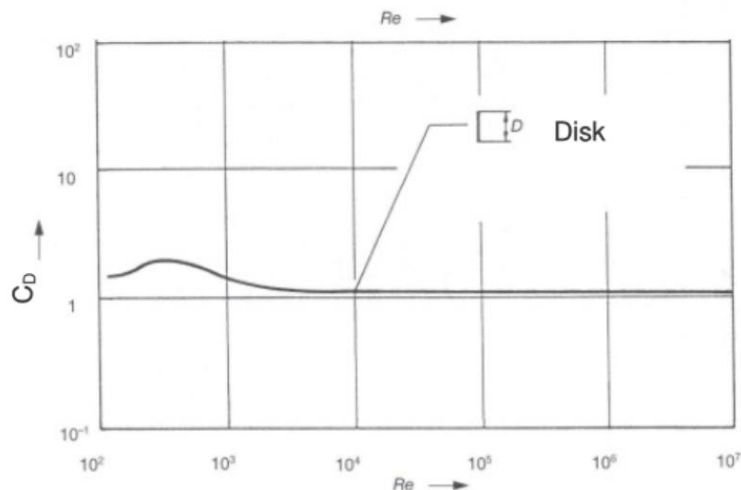


Figura 12 – Variação do coeficiente de arrasto de um disco com a variação do número de Reynolds [4].

Nos ensaios realizados, o valor do número de Reynolds cobria a gama $2 \cdot 10^4 < Re < 3 \cdot 10^5$.

3.3.2 Anemómetros

Relativamente aos anemómetros o processo experimental foi idêntico ao dos discos. Foram utilizados 3 anemómetros de copos diferentes (Figura 13), todos usados com muita frequência em campanhas de avaliação do recurso eólico:

- Anemómetro NRG#40;
- Thies first class;
- Vector A100L2/PC3



Figura 13 – Anemómetros utilizados (da esquerda para a direita: Vector; NRG; Thies).

Foram realizadas o mesmo tipo de medições que as referidas para os discos e dentro do mesmo intervalo de velocidades, tendo cada anemómetro sido testado tanto com os copos livres como com os copos presos, impossibilitando a sua rotação.

O cálculo do coeficiente de arrasto também foi efetuado de igual modo ao referido na equação 3.13, sendo o valor da área projetada dos anemómetros determinado segundo a instrução IT.05.00 do LAC que é a soma das seguintes parcelas:

- Área projetada de dois copos paralelos ao plano de trabalho;
- Área projetada de um copo colocado transversalmente ao escoamento;
- Área projetada do corpo do anemómetro
- Área projetada do suporte do anemómetro.

Na Tabela 1 encontram-se os valores calculados das áreas projetadas perpendicularmente ao escoamento de cada anemómetro.

Tabela 1 – Valor das áreas projetadas de cada um dos anemómetros utilizados.

Anemómetro	Valor da área projetada [m ²]
NRG	0,022112
THIES	0,024629
VECTOR	0,029609

4 Balança aerodinâmica

4.1 Principais objetivos

O objetivo de construir a balança aerodinâmica foi poder medir a força de arrasto que o escoamento provoca em objetos colocados na secção de teste. Posto isto, e tendo também em consideração que o tempo existente para projetar, conceber e realizar os ensaios previstos era escasso, procurou-se que a solução fosse simples, de execução e montagem célere e que ao mesmo tempo medisse com precisão a força de arrasto, não sendo objetivo desta balança medir qualquer outra força provocada pelo escoamento.

A solução construtiva tinha que servir tanto para os anemómetros como para os discos. Isto obrigou a que a balança tivesse que ter algumas diferenças para cada um desses objetos, nomeadamente em relação à parte em que esta se encontra dentro do túnel de vento e ao seu posicionamento, de modo a que discos e anemómetros se posicionassem a meio da secção de teste.

O projeto, construção e implementação da balança consumiram uma parte bastante significativa do tempo dedicado à elaboração desta dissertação.

4.2 Forças existentes nos ensaios no túnel de vento

Como referido no ponto 4.1, o intuito desta balança é medir unicamente a força de arrasto, mas não é esta a única força provocada pelo escoamento no objeto colocado da secção de teste. Poderão existir força de sustentação e força lateral e, no caso dos anemómetros, haverá um momento provocado pela rotação (“yaw”).

Na Figura 14 é possível visualizar as forças e momentos aerodinâmicos a que um objeto pode estar sujeito quando inserido no seio de um escoamento.

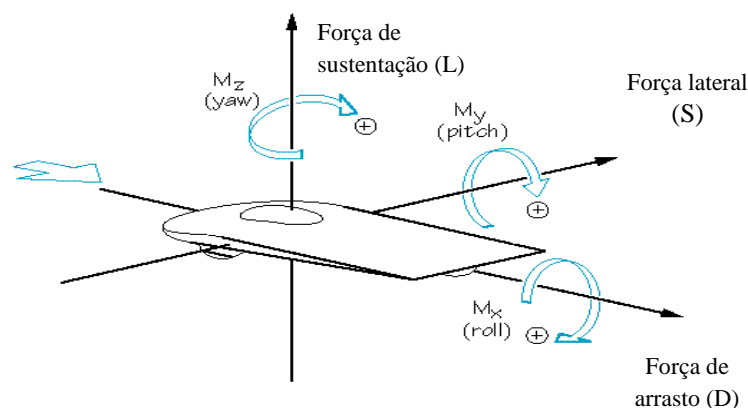


Figura 14 - Forças e momentos aerodinâmicos [7].

Apesar das diferentes componentes de força a que o modelo escolhido pode estar sujeito, é possível medir a força de arrasto, que corresponde à força que atua no objeto na direção do escoamento principal, com uma balança de apenas uma componente, desde que o alinhamento do objeto seja rigoroso.

4.3 Sensor/transdutor de força

4.3.1 Tipos de sensores de força

Há vários tipos de sensores/transdutores de força, sendo que os mais comuns são os extensômetros e os sensores piezoelétricos. Estes são utilizados em conjunto com um amplificador de sinal, um cartão de aquisição de dados e um computador para armazenar os resultados.

Os extensômetros são colocados num transdutor ou já fazem parte do mesmo, sendo constituídos por um elemento metálico cuja resistência elétrica varia consoante a deformação, dentro do seu domínio de deformação elástico.

Pela medição da variação da resistência elétrica do extensómetro é calculada a deformação do mesmo e pela lei de Hooke (equação 4.1) pode ser calculada a tensão que está a ser aplicada, que corresponde à força aplicada por unidade de área.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (4.1)$$

Onde:

σ é a tensão atuante no extensómetro

E é o módulo de young do material do objeto

ε é a deformação medida pelo extensómetro

Já os sensores piezoelétricos, quando uma força é aplicada, a sua deformação mecânica cria uma carga elétrica no cristal polarizado existente neste tipo de sensor.

Sabendo a capacidade do sensor é possível obter a diferença de potencial a que o mesmo está sujeito:

$$V = \frac{Q_f}{C} \quad (4.2)$$

Onde:

V é a diferença de potencial causada pela força aplicada no sensor

Q_f é a carga elétrica aplicada no cristal polarizado

C é a capacidade do sensor

Essa diferença de potencial é proporcional à força aplicada.

Ambos os sensores existem no mercado para grande amplitude de carga a medir e de precisão, sendo, duma maneira geral, os extensómetros mais adequados para medir forças estáticas e os sensores/transdutores piezoelétricos mais apropriados para medir forças dinâmicas [4].

4.3.2 Sensor de força utilizado

Para escolher qual o sensor a utilizar para medir a força de arrasto foram primeiro estimadas as forças máximas e mínimas a que este estaria sujeito aquando da realização dos ensaios.

Como referido na secção 3.3.1 o número de Reynolds deverá ser superior a 5000 para o coeficiente de arrasto ser independente do mesmo; logo, fazendo as contas para um Re superior a 1×10^4 , de modo a haver uma margem de segurança, obtemos a equação 4.3.

$$\frac{d \cdot v}{\nu} \geq 1 \times 10^4 \quad (4.3)$$

Onde:

d é o diâmetro do disco

v é velocidade do escoamento

ν é a viscosidade cinemática do ar

Assumindo que o valor da viscosidade cinemática do ar é $1,532 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, correspondente a uma temperatura de 20° C e uma pressão de 100 kPa , o valor da velocidade mínima para o disco mais pequeno, de 1% de rácio de bloqueio, vem:

$$v \geq 1,36 \text{ m/s}$$

Para o caso dos discos maiores, o valor da velocidade mínima é ainda menor. Se os testes forem todos realizados a uma velocidade superior a $1,36 \text{ m/s}$ estará sempre garantida a independência do coeficiente de arrasto em relação ao número de *Reynolds*. Como na calibração de anemômetros a gama de velocidades que importa é entre os 4 e os 16 m/s , os ensaios serão realizados entre esses valores, não havendo necessidade de aumentar ou encurtar essa gama de valores pelos motivos explicados.

Calculando a força de arrasto mínima dos discos pela equação 4.4, com $v_{\min}=4 \text{ m/s}$, $\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$, $C_{D\min}=1$ e $S_{\min}=0,01 \text{ m}^2$ (1% de BR), o valor da força de arrasto mínima vem igual a:

$$F_{D\min} = 0,096 \text{ N}$$

$$F_{D\min} = C_{D\min} \times 0,5 \times \rho \times v_{\min}^2 \times S_{\min} \quad (4.4)$$

Onde:

$C_{D\min}$ é o coeficiente de arrasto mínimo dos discos

ρ é a massa volúmica do ar

v_{\min} é a velocidade mínima do escoamento

S_{\min} é a área da secção do disco menor perpendicular ao escoamento

E pela equação 4.5, onde $v_{\max}=16 \text{ m/s}$, $\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$, $C_{D\max}=1,5$ e $S_{\max}=0,16 \text{ m}^2$ (16% de BR), o valor da força de arrasto máxima vem igual a:

$$F_{D\max} = 36,9 \text{ N}$$

$$F_{D\max} = C_{D\max} \times 0,5 \times \rho \times v_{\max}^2 \times S_{\max} \quad (4.5)$$

Na solução adotada vai ser utilizado um ponto de rotação, cuja distância ao centro do disco vai ser três vezes maior que a distância desse mesmo ponto de rotação ao sensor escolhido (secção 4.5); logo as forças medidas para pelo sensor vão estar no seguinte intervalo:

$$0,29 < F_{D\text{discos}} < 110,6 \text{ N}$$

Em relação aos anemômetros, tendo em consideração que as áreas dos mesmos se encontram compreendidas entre os $0,02$ e os $0,03 \text{ m}^2$, que as velocidades de escoamento

máximas e mínimas são as mesmas e que o coeficiente de arrasto deve ser mais ou menos semelhante ao valor esperado para os discos, é de esperar que o intervalo de força medido esteja dentro do intervalo de forças já estimado para os discos.

Depois de efetuados estes cálculos e analisados os diferentes sensores que poderiam ser utilizados, resolveu-se escolher uma célula de carga 108BA de 15 kg de carga, cujas propriedades estão mencionadas no anexo B e a calibração da mesma explicada no anexo C.

O facto de aumentar a força três vezes devido à concentração de momentos no ponto de rotação, faz com que se utilizem valores mais próximos do alcance da célula de carga, o que permite reduzir os possíveis erros de amplificação de sinal, melhorando a precisão dos resultados obtidos.

4.4 Interferências na medição da força no túnel de vento

4.4.1 Influência do suporte

Um dos desafios na planificação da balança aerodinâmica consiste em segurar o modelo na posição desejada, de modo a que a parte do suporte que esteja dentro da secção de teste tenha o menor efeito possível no escoamento e na medição do coeficiente de arrasto. Por muito que se tente minimizar esse efeito, este existirá sempre, pelo que se torna imprescindível estimá-lo e medi-lo.

O efeito que a estrutura de suporte tem no escoamento pode ser dividido em dois:

- Tara;
- Interferência.

A tara é a força de arrasto que sofre a estrutura de suporte dos modelos quando colocada no escoamento, enquanto que a interferência é o efeito dessa mesma estrutura no escoamento [4].

O suporte vertical para segurar os discos é o que se encontra representado Figura 15. Segundo a referência [4], sabe-se que o facto deste varão vertical ter arestas vivas vai provocar um efeito no escoamento que faz com que a força de arrasto provocada pelo mesmo não dê para ser “descontada” com precisão para os discos menores (1%, 2% e 4% de rácio de bloqueio). Tal acontece porque a medição dessa força de arrasto tem uma incerteza muito grande associada, comparativamente ao valor da força de arrasto medida para os mesmos discos.

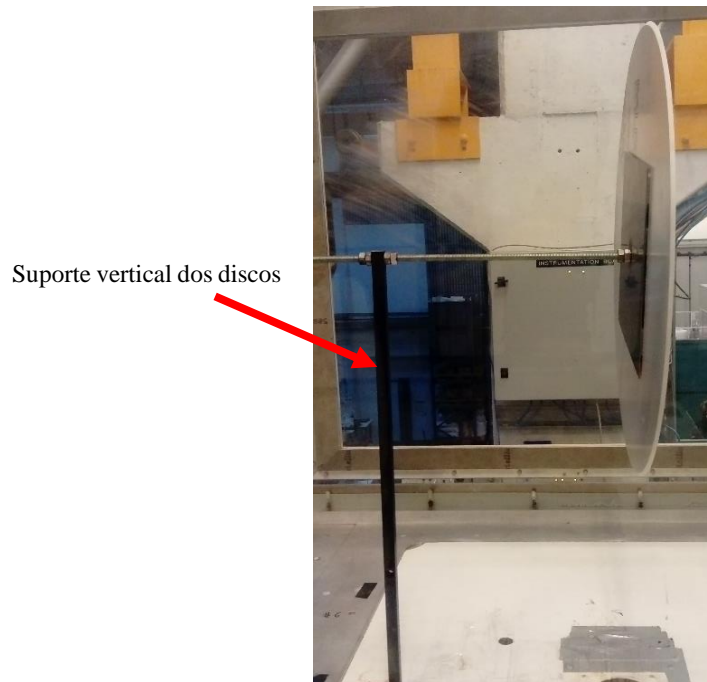


Figura 15 – Suporte vertical dos discos (de arestas vivas).

A mesma referência optou então, nos seus ensaios, por utilizar um “windshield” (Figura 16), peça cilíndrica à volta do varão vertical, de modo a não causar uma influência relevante nos valores obtidos do coeficiente de arrasto.



Figura 16 – *Windshield* utilizado à volta do suporte dos discos.

Nos ensaios realizados, optou-se por seguir o mesmo método do “windshield”, tendo, no entanto, sido realizado um ensaio apenas com esse componente dentro da secção de teste, de modo a aferir qual o valor da sua tara.

Os resultados desse ensaio estão representados no gráfico da Figura 17.

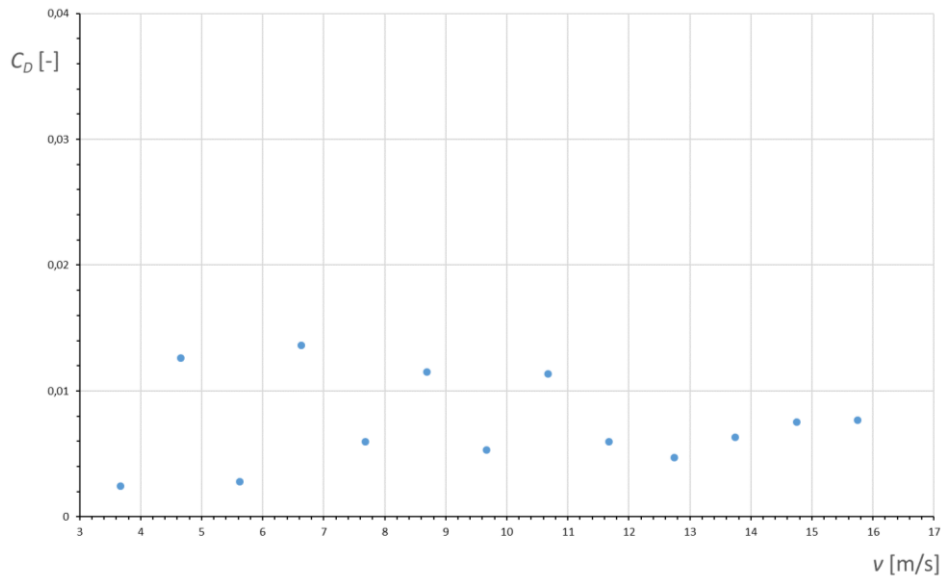


Figura 17 - Variação do coeficiente de arrasto do “windshield” com a variação da velocidade do escoamento.

Como é possível observar, o valor do coeficiente de arrasto do *windshield* foi sempre inferior a 0,015 e, como tal, desprezável.

Para comparar como variava o valor do coeficiente de arrasto com e sem o *windshield* foram efetuados ensaios para o disco de 6% de rácio de bloqueio. Os resultados encontram-se no gráfico da Figura 18.

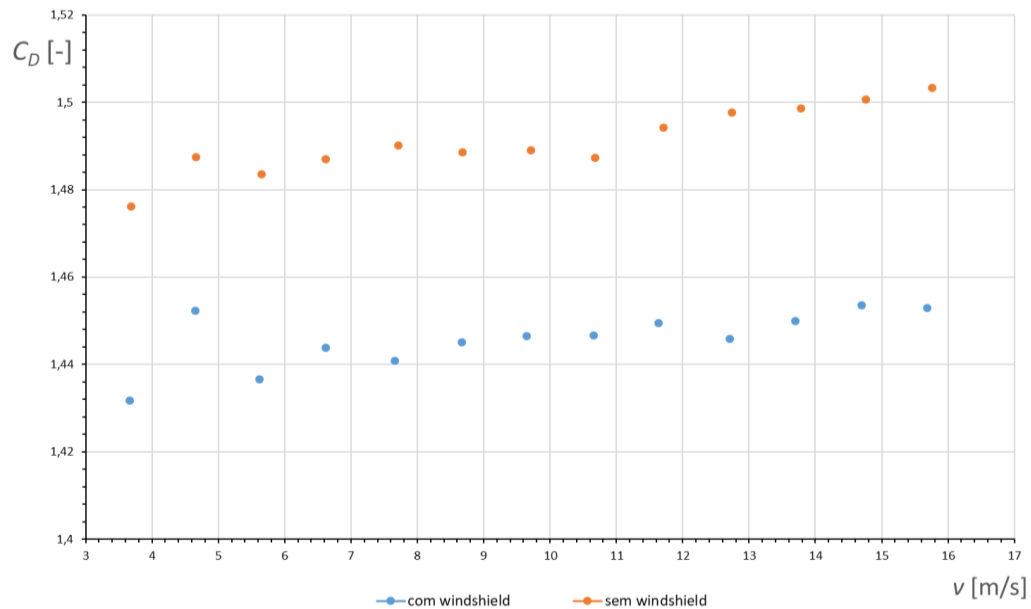


Figura 18 – Gráfico da variação do C_D em função da velocidade de escoamento para o disco de 6% de BR, com e sem o “windshield”.

Comparando os valores da Figura 18 para cada velocidade, concluiu-se que o valor do coeficiente de arrasto para o disco de 6% de rácio de bloqueio sem o *windshield* aumentava em média cerca de 3%.

4.4.2 Influência da forma do objeto

Outro fator que influencia as medições da força de arrasto no túnel de vento é a forma do objeto em estudo.

Os corpos esbeltos alinhados com o escoamento, vulgarmente conhecidos como “streamlined bodies”, são menos afetados por pequenas alterações no escoamento ou influências externas do que corpos de formas diferentes, nomeadamente discos perpendiculares ao escoamento que possuem uma inércia baixa na direção do escoamento e são, consequentemente, sensíveis a vibrações.

O chanfro de 45° dos discos a jusante tem influência crucial na medição da força de arrasto dos discos. Permite forçar a separação mais precoce do escoamento, assegurando um escoamento estável e tornando a medição do coeficiente de arrasto independente do número de Reynolds. Para além disso, o chanfro permite que os ensaios, apesar dos discos não serem semelhantes (pois a sua espessura é constante e o diâmetro varia de disco para disco), não sejam afetados por condições de não similaridade.

4.4.3 Outras possíveis interferências

Há sempre fatores extra que podem interferir nas medições do escoamento, como por exemplo o facto de o varão que segura os discos, e a placa colada aos mesmos, estar a diminuir a área de atuação da pressão do escoamento a jusante do mesmo ou o efeito de turbulência na medição dos valores do arrasto (Figura 19).

No entanto, no primeiro caso a redução da área da parte a jusante do discos é insignificante, assim como os níveis de turbulência ao longo dos ensaios são bastante baixos (como já referido na secção 3.1.3) o que leva a que estes dois efeitos sejam negligenciáveis.

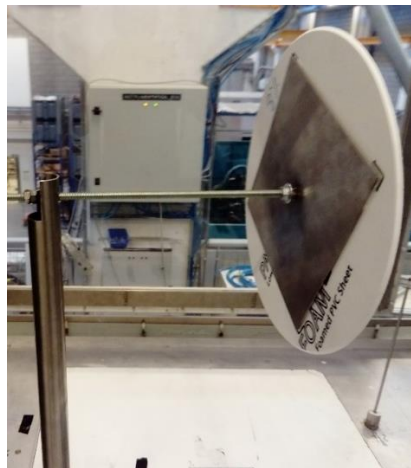


Figura 19 - Demonstração da colagem dos discos.

4.5 Solução construtiva

O projeto da balança aerodinâmica foi um processo demorado pois teve em conta muita reflexão e elaboração em *SolidWorks* de várias soluções construtivas, de modo a tentar otimizar a solução, em que os principais requisitos foram os seguintes:

- Conseguir medir com o máximo de precisão a força de arrasto;

- Ter a capacidade de medir forças para todos os ensaios, independentemente se fosse disco ou anemómetro e do tamanho dos mesmos;
- Evitar ao máximo fatores que possam condicionar a medição correta da força (como atritos, más ligações entre peças...);
- Ser uma balança de apenas uma componente;
- Conseguir colocar os discos e os anemómetros no local pretendido e bem fixos;
- Causar o mínimo de interferência no escoamento;
- Ter compatibilidade com o túnel de vento existente;
- Ser executável num período de tempo reduzido.

Inicialmente pensou-se numa solução em que a célula de carga estava “em linha” com o suporte vertical quer dos discos, quer dos anemómetros, como mostra a Figura 20.

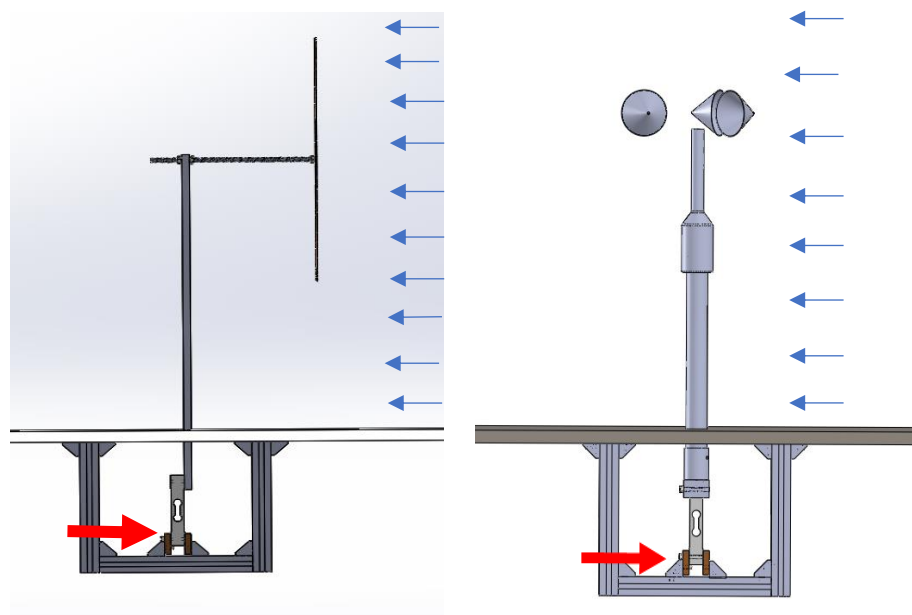


Figura 20 – Solução pensada inicialmente da balança aerodinâmica (à esquerda para os discos e à direita para os anemómetros).

No entanto, esta solução acabou por ser preterida em favor de outra com um eixo de rotação onde são concentrados os momentos da força e da reação do apoio da célula de carga, como é possível observar na Figura 21.

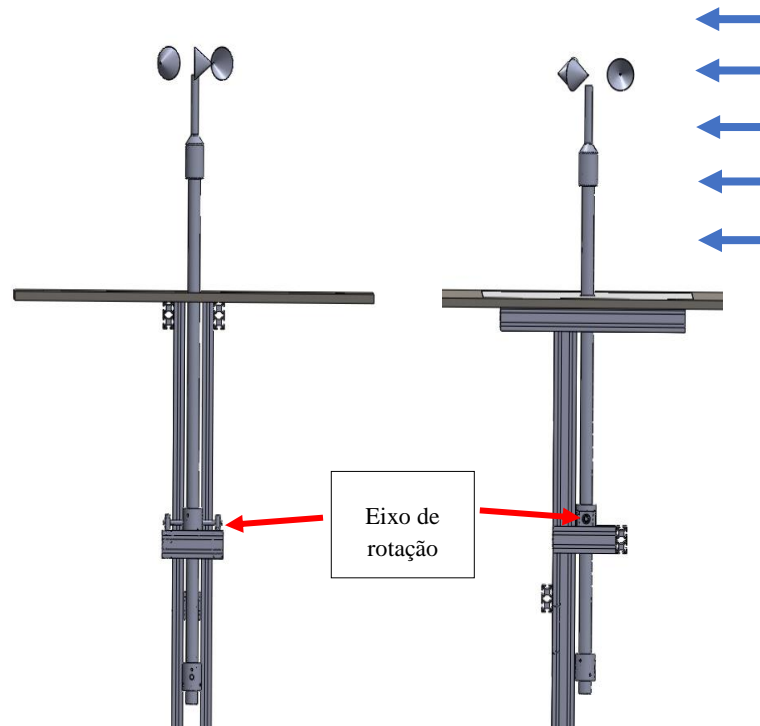


Figura 21 - Vistas frontal (lado esquerdo) e lateral (lado direito) da balança aerodinâmica.

Esse eixo de rotação consiste em duas chumaceiras em que, em cada uma, passa um veio que se liga a uma peça cilíndrica que, por sua vez, está ligada ao tubo vertical que segura os anemómetros, como é possível ver com mais pormenor na Figura 22.

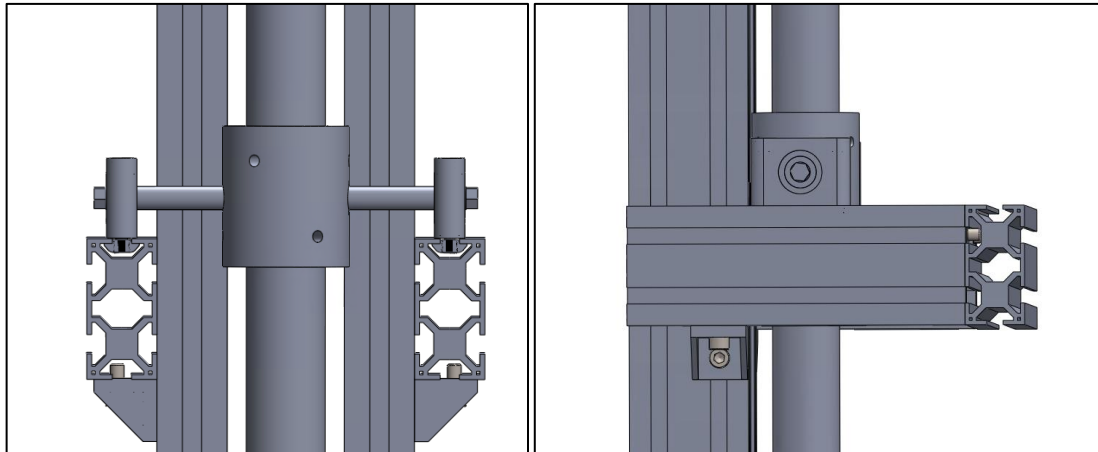


Figura 22 – Eixo de rotação da balança aerodinâmica.

A célula de carga está segura a um perfil horizontal da estrutura, estando a outra extremidade ligada, através de um parafuso, a uma peça de transição. Esta, por sua vez, está ligada com um perno metálico a um terminal de uma rótula. O terminal de rótula, também por intermédio de uma ligação roscada, contacta com a peça cilíndrica que circunda o tubo vertical da estrutura, como é possível observar na Figura 23.

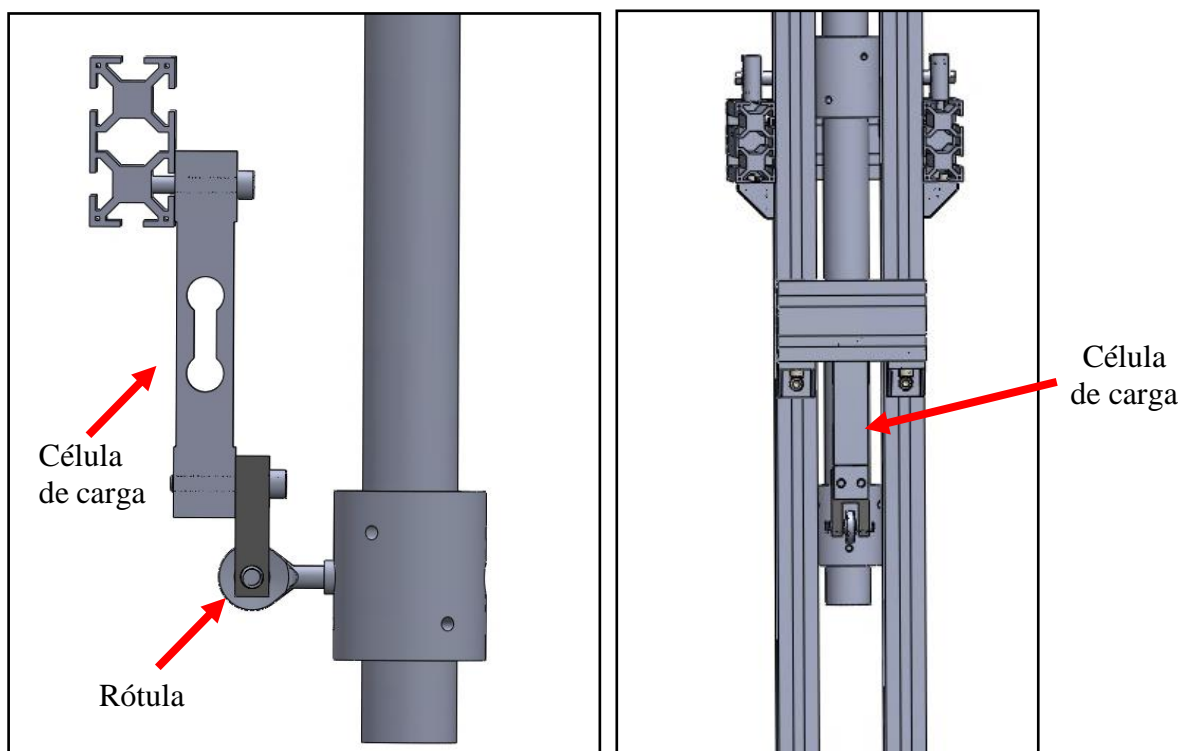


Figura 23 – Representação da montagem da célula de carga na balança aerodinâmica.

A distância entre o eixo de rotação e o anemómetro/disco é três vezes maior que a distância entre o eixo de rotação e o ponto da célula de carga onde é medida a força de arrasto, o que leva a um incremento em 300% da força lida. Este facto faz com que as forças medidas na célula de carga tenham uma magnitude mais adequada à mesma, diminuindo a incerteza relativa.

A solução construtiva para medir a força de arrasto dos discos é a representada na Figura 24.

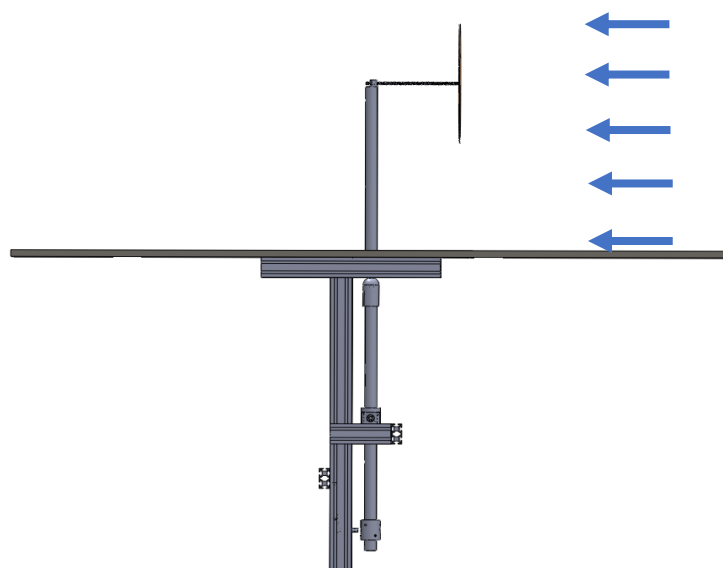


Figura 24 - Solução construtiva da balança aerodinâmica para os discos.

Como é possível constatar, a estrutura da balança aerodinâmica construída é a mesma tanto para os anemómetros como para os discos, sendo que o que altera é a parte da mesma que

está dentro da secção de teste e a posição da balança longitudinalmente, com o propósito de colocar tanto os discos como os anemómetros a meio da secção de teste.

Há dois perfis horizontais que estão presos à tábua que faz parte do “chão” da secção de teste que têm um comprimento significativo, permitindo ajustar o posicionamento da estrutura da balança, como é possível ver na Figura 25.

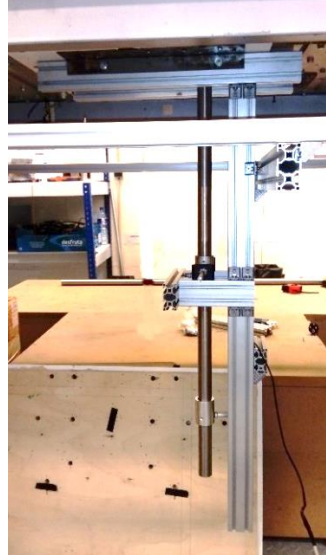


Figura 25 – Balança aerodinâmica.

Como já explicado na secção 4.4.1, o varão quadrangular posicionado verticalmente que faz de suporte dos discos (Figura 26 à esquerda) provoca o aumento do coeficiente de arrasto. Como o que se pretende medir é o arrasto causado pelos discos, colocou-se um tubo circular à volta do mesmo (*windshield*) (Figura 26 à direita).

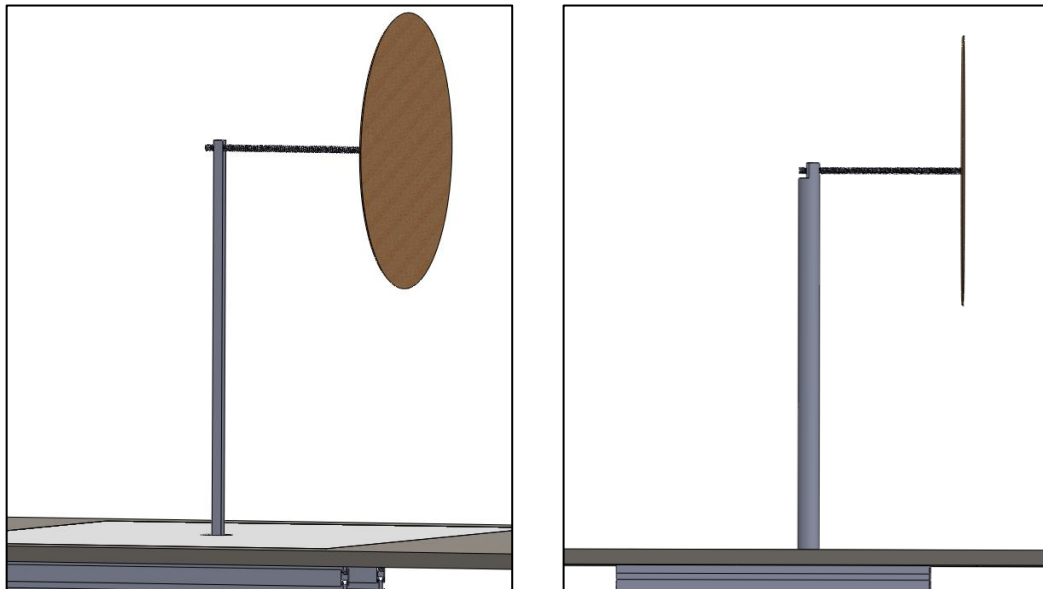


Figura 26 - Suportes dos discos dentro da secção de teste sem o *windshield* (à esquerda) e com o *windshield* (à direita).

5 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais estão divididos em três partes: os resultados obtidos nas medições com os discos; os resultados nas medições com os anemômetros; a correção proposta para a velocidade medida devido ao efeito de bloqueio.

As medições efetuadas e resultados alcançados têm associados incertezas de medição, tendo sido efetuada uma análise de incertezas que pode ser consultada no anexo D.

5.1 Discos

Na Figura 27 encontram-se os resultados experimentais para os sete discos de diferentes rácios de bloqueio.

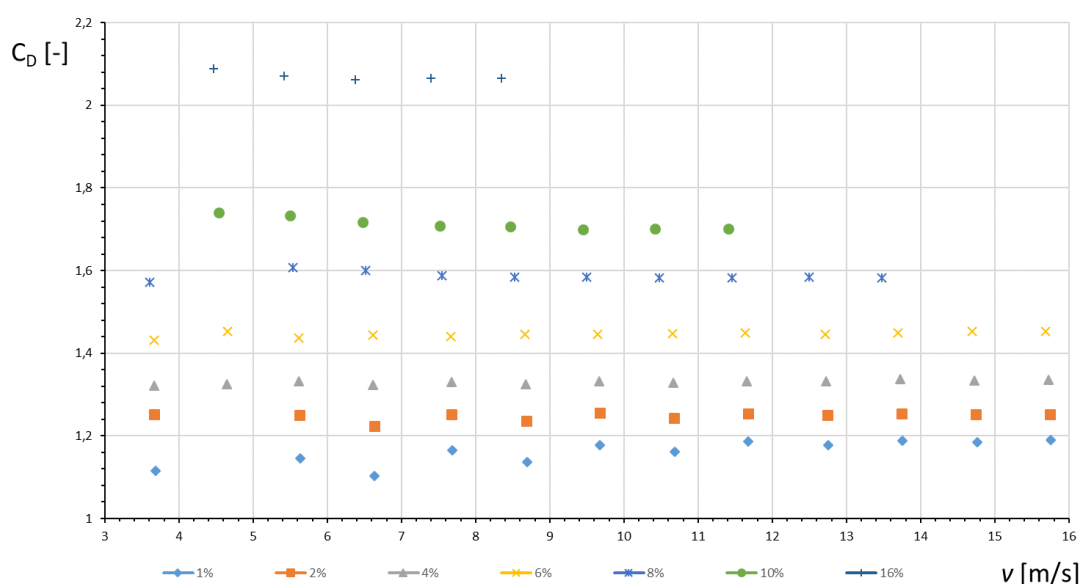


Figura 27 – Variação do valor do coeficiente de arrasto em função da velocidade de escoamento para os sete discos.

Como era de prever, o valor do coeficiente de arrasto manteve-se praticamente contante com a variação da velocidade de escoamento para cada disco. Na Figura 28 estão representados os mesmos resultados experimentais, mas em função do número de *Reynolds*, de modo a estarem as duas grandezas adimensionalizadas.

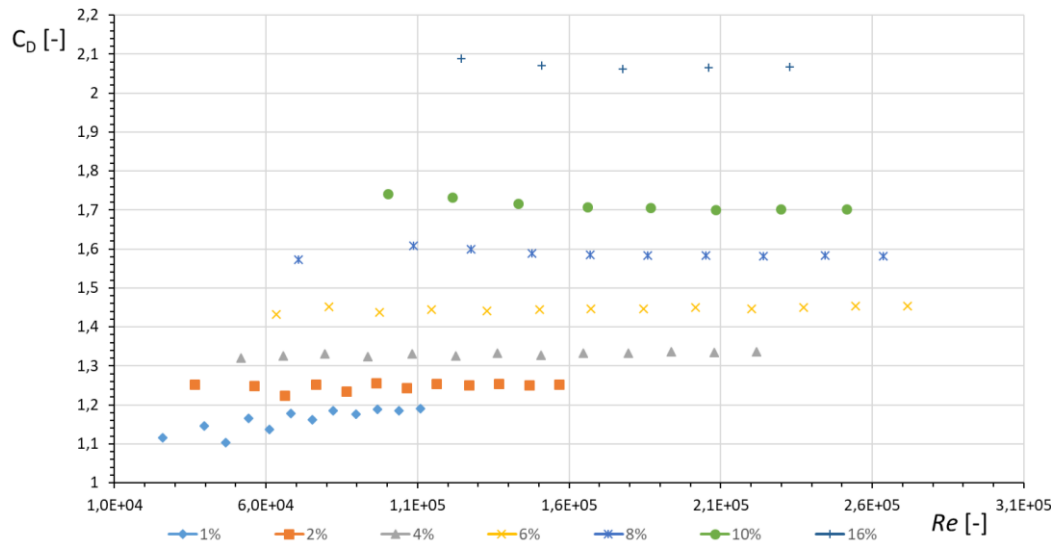


Figura 28 - Variação do valor do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds para os sete discos.

Para os discos maiores, de 8%, 10% e 16% de rácio de bloqueio, não foi possível medir a força de arrasto até à velocidade de 16 m/s pois, ainda antes de atingir essa velocidade, o suporte vertical encostava no *windshield*, impossibilitando a medição correta da força (Figura 29). Para os discos de 8%, 10% e 16% foi possível medir até uma velocidade nominal de 14, 12 e 9 m/s, respetivamente.



Figura 29 – Suporte dos discos a encostar no windshield para as velocidades mais elevadas dos maiores discos.

De notar que os valores de coeficiente de arrasto a 5 m/s para os discos de 1%, 2% e 8%, e a 4 m/s nos disco de 10% e 16%, foram rejeitados após a aplicação do critério de *Chauvenet* [15]:

$$\tau = \frac{x_{m\acute{a}x}}{S_{C_D}} \quad (5.1)$$

Onde:

$x_{m\acute{a}x}$ é o desvio máximo admissível para o C_D seguindo o critério de *Chauvenet*

S_{C_D} é o desvio padrão dos vários valores obtidos de C_D para cada disco

τ é o valor do desvio normalizado (neste caso igual a 2,07 por haver 13 valores de C_D)

Os valores máximos e mínimos do valor de C_D para cada disco são dados por:

$$C_{D_{m\acute{a}x}} = \overline{C_D} + x_{m\acute{a}x} \quad (5.2)$$

$$C_{D_{m\acute{i}n}} = \overline{C_D} - x_{m\acute{a}x} \quad (5.3)$$

Onde:

$\overline{C_D}$ é o valor médio dos valores de C_D calculados para todas as velocidades.

A explicação para todos os valores que tiveram que ser eliminados corresponderem a velocidades de ensaio de 4 e 5 m/s terá a ver com o facto de serem as velocidades mais baixas, o que faz com que a força de arrasto a medir seja também ela baixa e, consequentemente, a medição dessas forças é suscetível a uma maior incerteza.

Também o facto de os discos a 6% e 8% de BR serem os únicos em que não foi necessário eliminar pontos, poderá ser devido a se tratarem dos discos de tamanho intermédio. Ou seja, os discos menores têm uma maior incerteza porque a força a medir é mais baixa e os discos maiores sofrem uma maior vibração, o que também influencia negativamente os resultados.

Todos os cálculos seguintes foram efetuados já sem esses valores rejeitados do C_D através do critério de *Chauvenet*.

Nas Figura 30 e Figura 31 apresentam-se os gráficos que permitiram calcular o valor de C_{D0} (valor do coeficiente de arrasto sem bloqueio) através de uma extrapolação em função do rácio de bloqueio e do parâmetro de bloqueio, respetivamente.

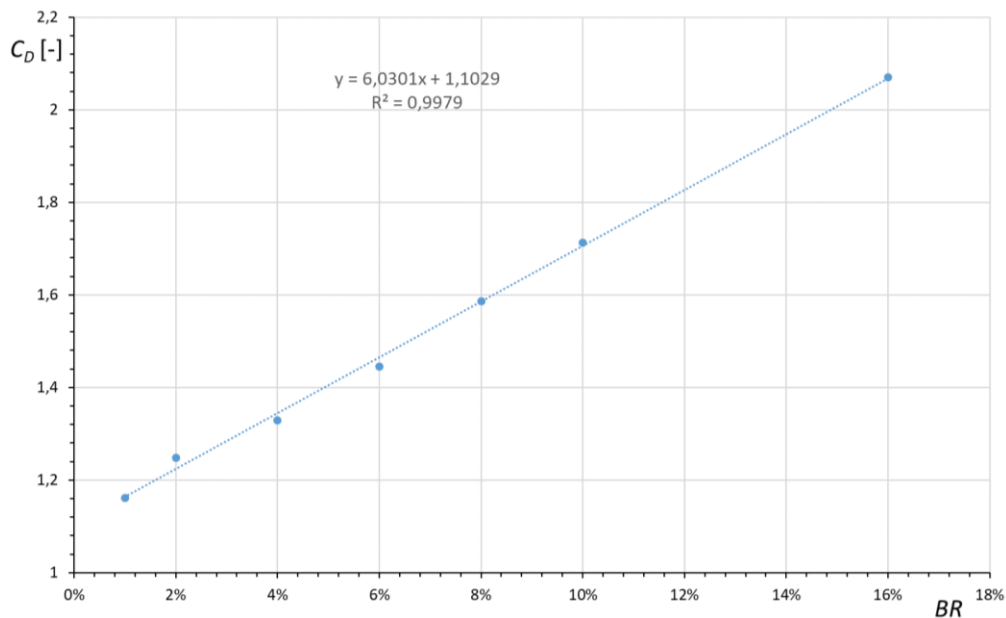


Figura 30 - Variação do C_D medido em função do rácio de bloqueio.

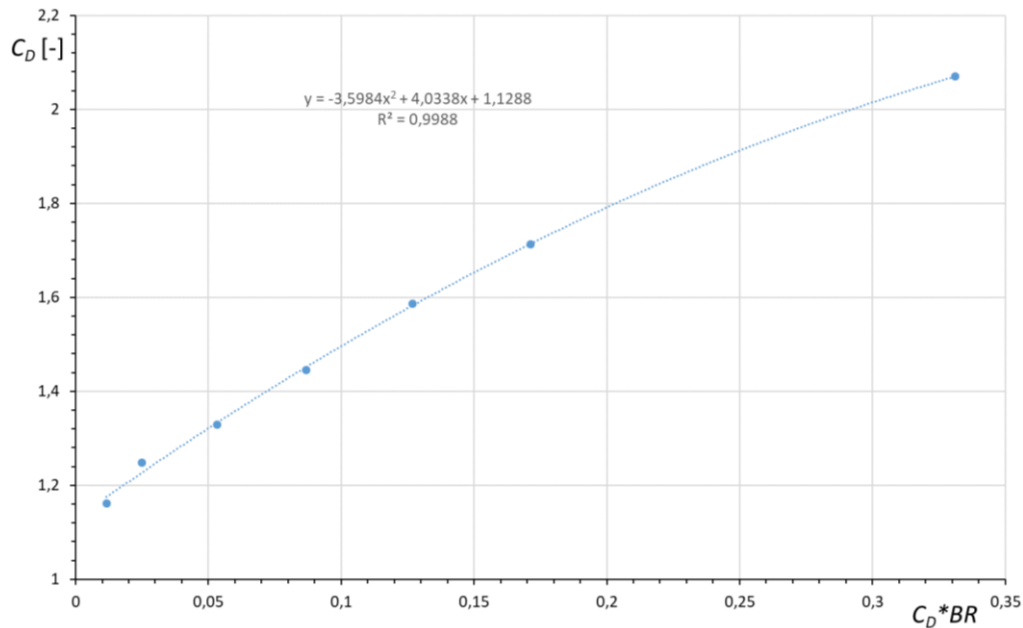


Figura 31 - Variação do C_D medido em função do parâmetro de bloqueio.

Pela observação dos gráficos da Figura 30 e Figura 31 constata-se que seguem tendências diferentes. Verifica-se que o coeficiente de arrasto aumenta linearmente em função do rácio de bloqueio, mas em função do parâmetro de bloqueio isso já não se verifica, sendo a sua evolução melhor aproximada por uma curva polinomial de segundo grau.

Também se verifica que os valores do C_{D0} são ligeiramente diferentes para os dois casos, sendo o valor do mesmo igual a 1,103 segundo o rácio de bloqueio, e igual a 1,129 segundo o parâmetro de bloqueio.

Essa diferença de 0,026 no valor do C_{D0} pode ser explicada por vários motivos:

- Possíveis erros de medição, que podem ter sido causados devido a vibrações, uma vez que a estrutura onde se encontra o túnel de vento do LAC é muito suscetível a esses fenómenos que são mensurados pela célula de carga;
- Nos discos mais pequenos o valor da incerteza da medição é relativamente alto face à magnitude da força medida, o que pode levar a erros ao efetuar a extrapolação para o valor de C_{D0} ;
- As curvas de extrapolação utilizadas são sempre uma aproximação, sendo no caso do rácio de bloqueio o valor de R^2 igual a 0,9979 e no caso do parâmetro de bloqueio R^2 é igual a 0,9988; no entanto, neste caso trata-se de uma aproximação polinomial.

Dos pontos descritos, o primeiro deverá ter sido o de maior importância.

Tendo por base a equação do arrasto:

$$D = 0,5 * \rho * v^2 * C_D * S = 0,5 * \rho * v_c^2 * C_{D0} * S \quad (5.4)$$

Onde:

C_D é o coeficiente de arrasto calculado para cada disco.

v é a velocidade medida do escoamento a meio da secção de teste

C_{D0} é o coeficiente de arrasto sem o efeito de bloqueio

v_c é a velocidade corrigida (velocidade caso não houvesse efeito de bloqueio do túnel)

Chega-se ao seguinte rácio entre a velocidade corrigida e a velocidade medida no túnel de vento:

$$\frac{v_c}{v} = \left(\frac{C_D}{C_{D0}} \right)^{0,5} \quad (5.5)$$

A partir da equação 5.5 e dos valores de C_{D0} calculados foram construídos os gráficos das Figura 32 e Figura 33, onde está representado o rácio da velocidade corrigida sobre a medida dentro do túnel em função do rácio de bloqueio e do parâmetro de bloqueio, respetivamente.

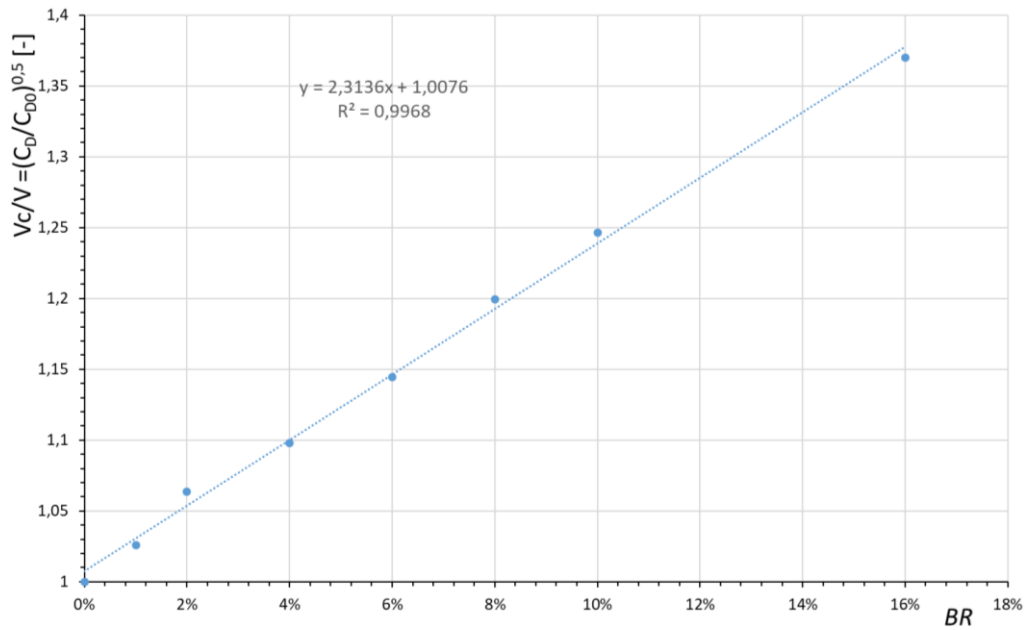


Figura 32 - Rácio da velocidade corrigida sobre a velocidade medida em função do rácio de bloqueio.

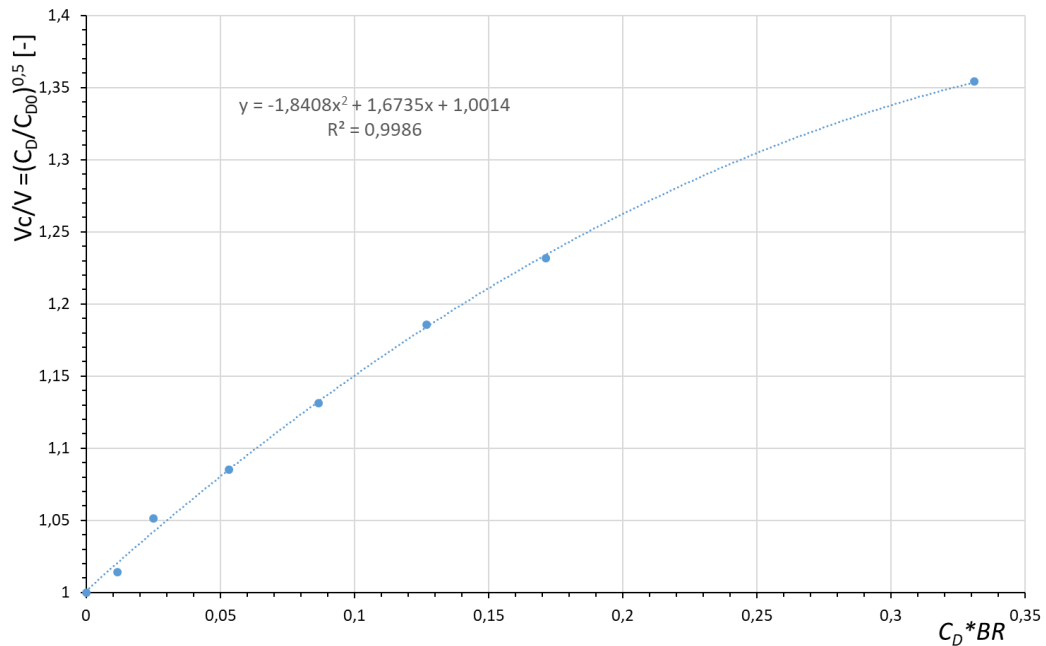


Figura 33 - Rácio da velocidade corrigida sobre a velocidade medida em função do parâmetro de bloqueio.

Os valores de C_D das figuras 32 e 33, são o valor médio deste para cada disco.

Seguidamente, foram comparados os resultados experimentais obtidos com os sugeridos na literatura, referidos na secção 3.2 do presente relatório, através dos gráficos das Figura 34 e da Figura 35.

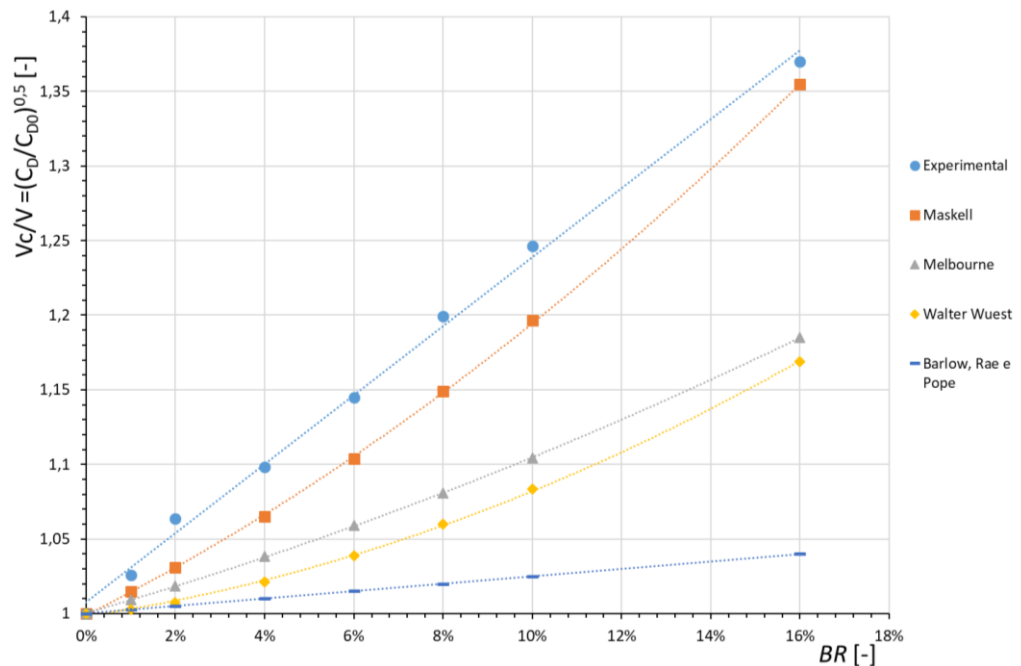


Figura 34 – Comparação do rácio da velocidade corrigida sobre a velocidade medida em função do rácio de bloqueio com os valores sugeridos por diferentes autores.

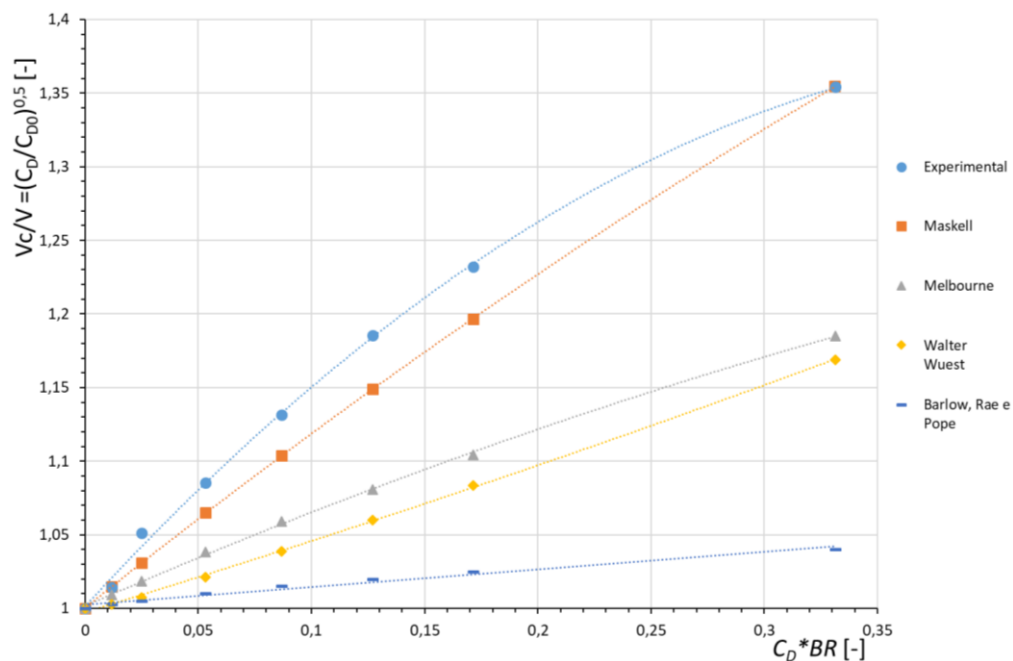


Figura 35 - Comparação do rácio da velocidade corrigida sobre a velocidade medida em função do rácio de bloqueio com os valores sugeridos por diferentes autores.

Para a correção de Maskell foi considerado $\varepsilon=2,52$; para Melbourne $K=1,8$ e para a correção de Walter Wuest $\lambda=3,3$ e $\tau=0,8$ (ver equações no capítulo 3.2).

Após observação destas duas últimas figuras, conclui-se que os resultados experimentais sugerem que qualquer umas das correções subvaloriza o efeito do bloqueio detetado nos ensaios realizados, sendo que a correção que mais se aproxima dos valores experimentais é a de Maskell.

5.2 Anemômetros

Relativamente aos anemômetros o valor do coeficiente de arrasto em função da velocidade de escoamento para cada caso pode ser observado na Figura 36.

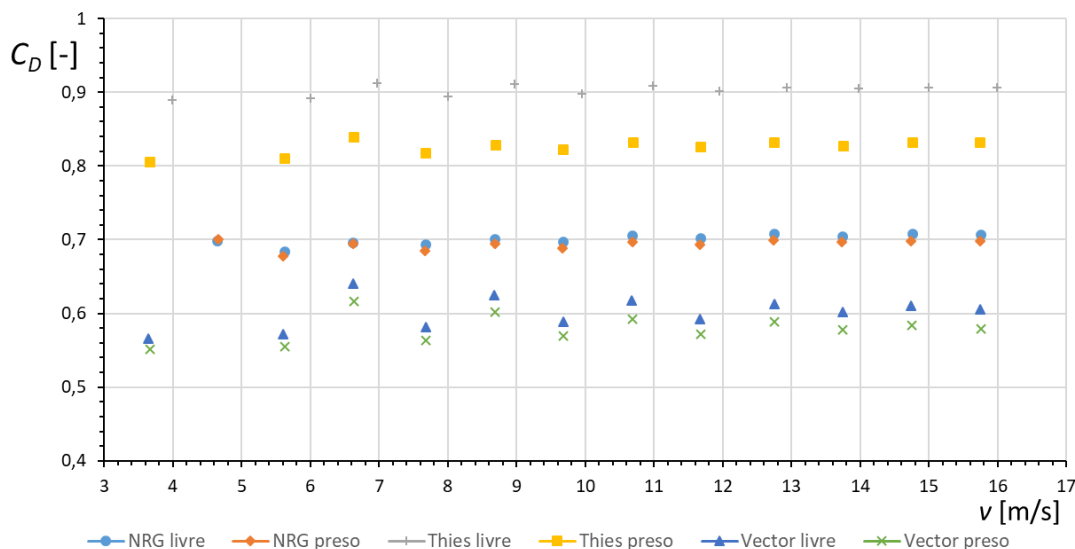


Figura 36 - Variação do valor do coeficiente de arrasto em função da velocidade de escoamento para os anemômetros.

Tal como no caso dos discos, também foi aplicado o *critério de Chauvenet* aos valores de C_D obtidos, tendo sido eliminados os pontos a 4 m/s do NRG livre e do NRG preso, e os valores a 5 m/s do Thies livre, Thies preso, Vector livre e Vector preso.

Destaca-se no gráfico da Figura 36 que, como seria de esperar, para cada anemómetro o valor do coeficiente de arrasto é maior quando este está livre. Nota-se, no entanto, que no caso do anemómetro Thies essa variação foi bem maior que nos restantes casos e que no anemómetro NRG a diferença é muito pouco significativa.

Para além disso, constata-se que os valores do anemómetro Vector são os que variam mais, o que poderá ser explicado por este ser o anemómetro em que a força de arrasto provocada pelo escoamento é menor, logo a incerteza de medição é maior e mais suscetível a fatores externos (vibrações, etc.).

Para os anemómetros não foi possível repetir o procedimento para cálculo do C_{D0} pois todos os anemómetros utilizados têm formas diferentes, e, como o coeficiente de arrasto é um parâmetro que depende da forma do objeto, só seria possível repetir o procedimento caso houvesse anemómetros com a mesma forma, mas tamanho diferente, o que não foi possível de obter.

A utilização dos valores de C_D de cada anemómetro (preso e livre) para o cálculo desse valor de C_{D0} também não faz sentido, pois a área do bloqueio é a mesma. O valor do coeficiente de arrasto varia de um caso para outro apenas devido à velocidade que os copos adquirem quando não estão presos.

No entanto, a correção de *Pankhurst e Holder* referenciada no ponto 3.2 deste relatório pode ser utilizada para anemômetros e servir como comparação com os valores esperados, calculados a partir da equação que se obteve no caso dos discos.

Conforme a equação 3.10, para calcular o valor referente ao bloqueio sólido como sugerido pela correção de Pankhurst e Holder, é necessário medir tanto a altura e diâmetro de cada um dos cilindros em que é dividido o anemómetro (consultar a correção na secção 3.2), como o volume de cada uma dessas partes. Esses valores encontram-se nas Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 2- Dados relativos às dimensões do anemómetro NRG

NRG	t (altura) [m]	c (diâmetro) [m]	Volume [cm ³]
Cilindro copos	0,05	0,19	82,467
Cilindro do veio entre copos e corpo	0	0	0,000
Cilindro do corpo	0,1	0,03	70,686
Cilindro do suporte	0,235	0,034	213,361
	0,085	0,014	13,085
	0,08	0,045	127,235
TOTAL			506,833

Tabela 3 – Dados relativos à dimensão do anemómetro THIES

THIES	t (altura) [m]	c (diâmetro) [m]	Volume [cm ³]
Cilindro copos	0,078	0,25	268,783
Cilindro do veio entre copos e corpo	0,19	0,018	48,349
Cilindro do corpo	0,09	0,05	176,715
Cilindro do suporte	0,25	0,034	226,980
TOTAL			720,827

Tabela 4 - Dados relativos à dimensão do anemómetro VECTOR

VECTOR	t (altura) [m]	c (diâmetro) [m]	Volume [cm ³]
Cilindro copos	0,051	0,157	55,156
Cilindro do veio entre copos e corpo	0,1115	0,012	12,610
Cilindro do corpo	0,063	0,055	149,677
Cilindro do suporte	0,013	0,016	2,614
	0,03	0,038	34,023
	0,127	0,06	359,084
	0,06	0,047	104,097
	0,11	0,034	99,871
TOTAL			817,133

Quanto à correção obtida através dos discos, uma vez que o efeito de bloqueio depende, além da área do objeto, da forma do mesmo, vai ser usada a expressão de aproximação obtida da Figura 33:

$$\frac{v_c}{v} = -1,84 * (C_D * BR)^2 + 1,67 * C_D * BR + 1 \quad (5.6)$$

Na Figura 37 é possível comparar os valores da correção de *Pankhurst e Holder* com os valores obtidos através da equação 5.6.

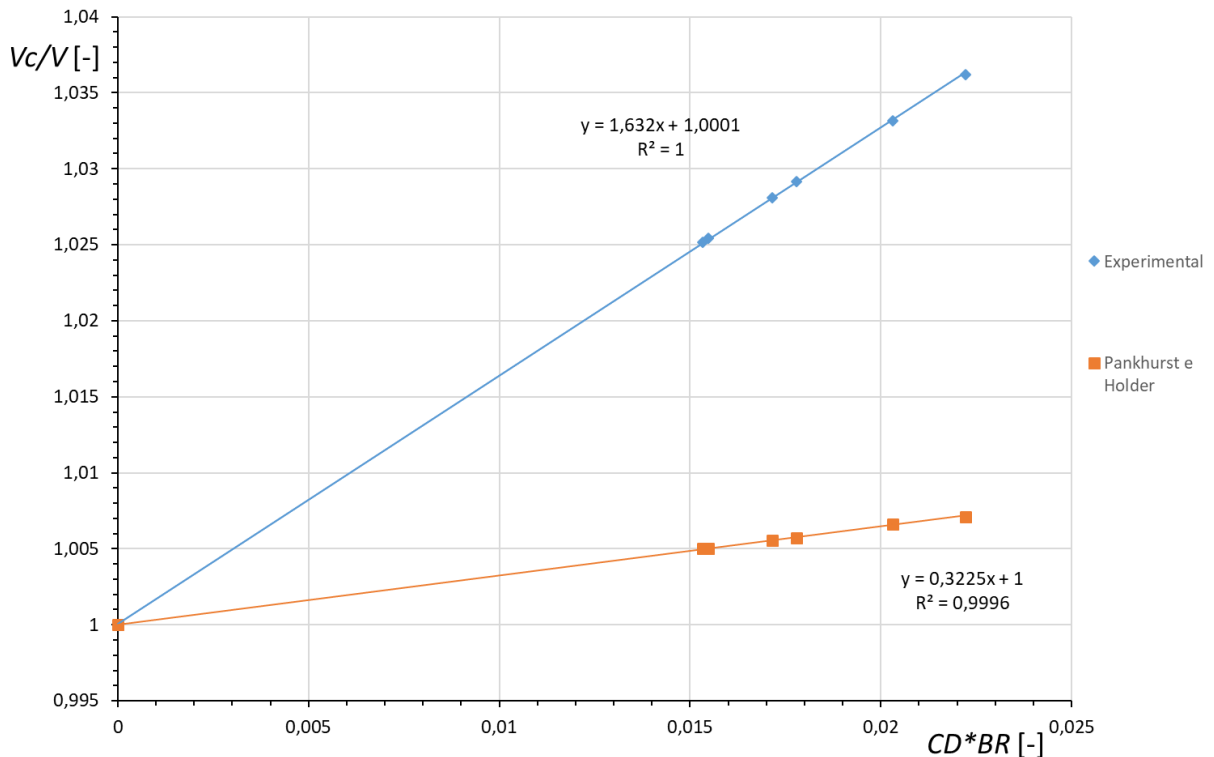


Figura 37 – Quociente entre a velocidade corrigida e a velocidade medida em função do parâmetro de bloqueio, segundo a relação experimental dos discos e a correção de Pankhurst e Holder.

Conclui-se que a correção proposta por *Pankhurst e Holder*, tal como acontecia com as correções presentes na literatura utilizadas para os discos, subestima o efeito de bloqueio detetado nestes ensaios.

Em ambos os gráficos da Figura 37 forçou-se que o valor da ordenada na abcissa fosse 1, ou seja, que para um rácio de bloqueio nulo a velocidade medida seja igual à velocidade corrigida, tendo-se obtido para ambos os casos uma correlação linear, em que para *Pankhurst e Holder* o valor de R^2 é igual a 0,9996 e para os pontos experimentais $R^2=1$.

5.3 Correção referente ao efeito de bloqueio proposta

Depois de obtidos os resultados experimentais, descritos nas secções 5.1 e 5.2, é finalmente possível propor a correção da velocidade medida no túnel de vento do LAC.

A partir da correlação linear dos pontos experimentais da Figura 37, retira-se a equação dessa correção proposta pelo trabalho realizado nesta dissertação (equação 5.7).

$$\frac{v_c}{v} = 1,632 * C_D * BR + 1 \quad (5.7)$$

Uma vez que, em termos práticos, poderá ser mais simples aferir a correção da velocidade medida através da força de arrasto, ao invés do coeficiente de arrasto, a equação 5.7, pode então adquirir a seguinte forma:

$$v_c = v + \frac{3,264 * D}{\rho * v * C} \quad (5.8)$$

Para o caso específico do túnel de vento do LAC, cuja área de secção de teste é 1m², a equação 5.8 pode ainda ser simplificada:

$$v_c = v + \frac{3,264 * D}{\rho * v} \quad (5.9)$$

6 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

Com a elaboração desta dissertação chegou-se às seguintes conclusões:

- O efeito de bloqueio é um fenómeno presente nos túneis de vento e o seu efeito na correta medição da velocidade é significativo, mesmo para baixos rácios de bloqueio;
- A medição da força de arrasto revelou-se um método eficaz para avaliar o efeito de bloqueio;
- No caso de discos perpendiculares ao escoamento e com um chanfro de 45° a jusante, a variação do coeficiente de arrasto com o rácio de bloqueio é linear, mas em função do parâmetro de bloqueio ($CD \cdot BR$) é uma variação polinomial de segunda ordem;
- As correções encontradas na literatura conduzem todas a uma correção da velocidade inferior à que foi calculada experimentalmente através dos valores de coeficiente de arrasto obtidos;
- A Teoria de Maskell foi, dentro das teorias apresentadas, a que mais se aproximou dos valores propostos experimentalmente;
- A correção da velocidade proposta por Pankhurst e Holder para os anemómetros, subestima o efeito de bloqueio;
- O coeficiente de arrasto de um anemómetro é maior quando este está em rotação em comparação quando este está parado, podendo esta diferença ser mais ou menos acentuada mediante a forma do mesmo;
- A correção do efeito de bloqueio para o túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica e Calibração é:

$$v_c = v + \frac{3,264 * D}{\rho * v}$$

Em relação a trabalhos futuros, as propostas sugeridas são:

- Repetição do trabalho experimental executado, mas modificando a secção de teste do túnel de vento, de modo a avaliar o efeito de bloqueio para configurações de secção de teste aberta e semiaberta;
- Utilizar anemómetros com a mesma forma, mas diferentes tamanhos para medir a força de arrasto, de modo a poder seguir o procedimento utilizado para os discos em que é possível calcular o coeficiente de arrasto de bloqueio nulo e comparar se os resultados obtidos são idênticos à correção proposta;
- Utilizar programas numéricos (por exemplo o CFD) para estimar o efeito de bloqueio, a partir da conservação da quantidade de movimento no início e a meio da secção de teste do túnel de vento.

Referências

1. INEGI. 2011 [cited 2017 16/03/2017]; Available from: <http://www.inegi.pt/instituicao.asp?idm=1&idsubm=5&LN=>.
2. CIENER. 2011 [cited 2017 16/03/2017]; Available from: <http://www.inegi.up.pt/grupoidi/apresentacao.asp?idmm=18&idsubm=1&id=1&LN=>.
3. LAC. 2011 [cited 2017 16/03/2017]; Available from: http://www.inegi.up.pt/instituicao/meiossuporte_detalhe.asp?idm=1&idsubm=7&id=65&LN=.
4. Gray, N.M.B., *Efecto obstructivo o "blockage" en la calibracion de anemometros*, in *Departamento de Mecânica*. 2007, Universidad Tecnica Federico Santa Maria: Hamburgo.
5. Fitzgerald, R.E., *Wind tunnel blockage corrections for propellers*. 2007: ProQuest.
6. Dahlberg, J.-Å., *An investigation of wind tunnel blockage effects on cup anemometer calibrations*. 2006, FOI.
7. *Vehicle Body Engineering*. 2015; Available from: <http://itsmyblogvbe.blogspot.pt/2015/07/>.
8. autoblog. Available from: <https://www.autoblog.gr/wp-content/gallery/mercedes-benz-new-aeroacoustics-wind-tunnel/>.
9. *Aerodynamics: What is bluff body and blunt body? What is difference between them?* 2016 [cited 2017 Fevereiro de 2017]; Available from: <https://www.quora.com/Aerodynamics-What-is-bluff-body-and-blunt-body-What-is-difference-between-them>.
10. Fail, R., *Low-speed experiments on the wake characteristics of flat plates normal to an air stream*. 1959.
11. Maskell, E., *A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel*, RAE Aero. 1965, Rep.
12. measnet. 2017 [cited 2017 04-05-2017]; Available from: <http://www.measnet.com/>.
13. measnet, *Anemometer Calibration Procedure*. 2009.
14. Don D. Z. Zhao, T.S., *Ecotech Wind Tunnel Experimental Test and Study*. Ecotech Pty Ltd.
15. Coelho, P., *Slides "Experimentação e análise de incertezas"*. 2013.

ANEXO A: Características do túnel de vento

As principais características do túnel de vento do LAC encontram-se na Tabela A1. Imagens do túnel encontram-se na Figura A1.

Tabela A1 – Principais propriedades do túnel de vento

Propriedade	Valor
Potência elétrica [kW]	37
Área transversal da secção de teste [m ²]	1
Comprimento da secção de teste [m]	2
Velocidade máxima [m/s]	28
Intensidade de turbulência ($f < 10\text{Hz}$)	$< 1\%$
Não homogeneidade do escoamento	$< 2\%$
Configuração do circuito	aberto
Configuração da secção de teste	fechada

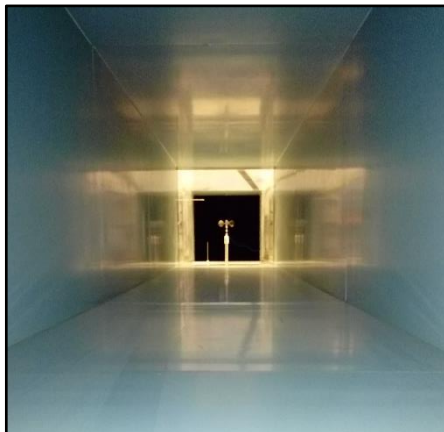


Figura A1 – Túnel de vento do LAC.

ANEXO B: Características do sistema de aquisição

O tubo de Pitot está conectado a um transdutor de baixa pressão diferencial de 250 Pa, cujo sinal elétrico é registado por um sistema de aquisição de dados da *National Instruments*, formado por um chassis NI cDAQ-9172 e módulos de conversão analógica-digital (NI920x, conforme a grandeza elétrica a ser medida). O mesmo sistema de aquisição de dados recebe os dados dos restantes sensores do laboratório, sensor de temperatura, humidade do ar e pressão atmosférica, cujas gamas de funcionamento e incerteza de medição se encontram na Tabela B1.

Tabela B1 – Gamas de funcionamento e incertezas do equipamento padrão do túnel do LAC

Grandeza medida	Gama de funcionamento	Incerteza
Temperatura	+10 a +50 °C	$\pm 0,8$ °C
Pressão atmosférica	600 a 1200 hPa	$\pm 0,7$ hPa
Humidade relativa	0 a 100 %	$\pm 3,6\%$

O transdutor ligado ao mesmo DAQ foi a célula de carga 108 BA (Figura B1), cujas principais características se encontram na Tabela B2.

Tabela B2 – Principais características da célula de carga utilizada

Propriedade	Valor
Capacidade [N]	150
Sensibilidade [mV/V]	$2 \pm 10\%$
Zero [mV/V]	$\pm 0,06$
Não-linearidade	$< \pm 0,017\%$
Erro de histerese	$< \pm 0,017\%$
Repetibilidade	$< \pm 0,017\%$
Fluência (em 30 min)	$< \pm 0,023\%$
Efeito da temperatura na sensibilidade	$< \pm 0,0012\%$
Efeito da temperatura no zero	$< \pm 0,0050\%$
Gama de temperatura nominal [°C]	-10 a 40



Figura B1- Fotografias da célula de carga utilizada.

ANEXO C: Calibração do equipamento

A calibração da célula de carga foi executada de duas maneiras distintas: calibração com a estrutura deitada (Figura C1) e calibração com a estrutura já montada no túnel de vento (Figura C2).

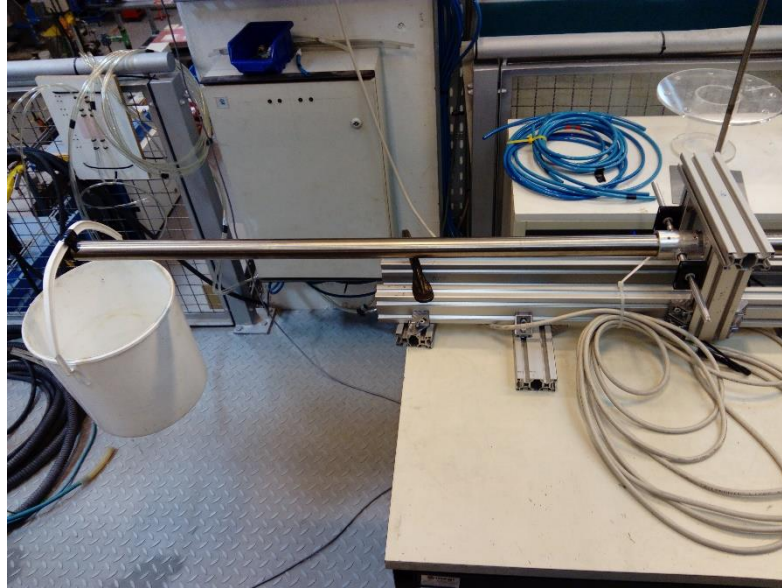


Figura C1 – Calibração realizada com a estrutura da balança aerodinâmica na horizontal.

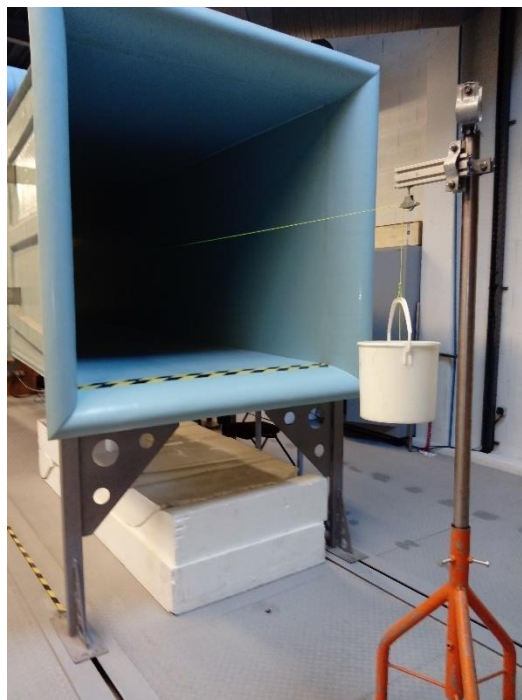


Figura C2 – Calibração com a estrutura da balança aerodinâmica na posição de funcionamento.

Relativamente à calibração com a estrutura da balança já montada no túnel de vento (na vertical), como é possível ver na Figura C2, foi ligado um fio desde a balança aerodinâmica na posição onde são colocados os discos e anemômetros, fazendo esse fio sair pelo difusor do túnel

de vento, onde foi suportado um balde (de massa conhecida) com massas conhecidas no interior do mesmo (Figura C4).

Este processo, no entanto, conduziu a resultados muito pouco lineares e pouco precisos, muito provavelmente devido ao atrito da roldana utilizada.

Já na calibração com a estrutura deitada, o procedimento seguido foi semelhante. Foram adicionados e subtraídos valores de massa conhecidas e registados os valores lidos. Com este método foi conseguido obter resultados fidedignos, sendo a curva obtida perfeitamente linear, como é possível ver na Figura C3. Com a estrutura deitada o valor do “zero” da balança é certamente diferente do “zero” com a estrutura na vertical, mas o único valor que realmente necessita de ser averiguado é o declive da curva experimental.

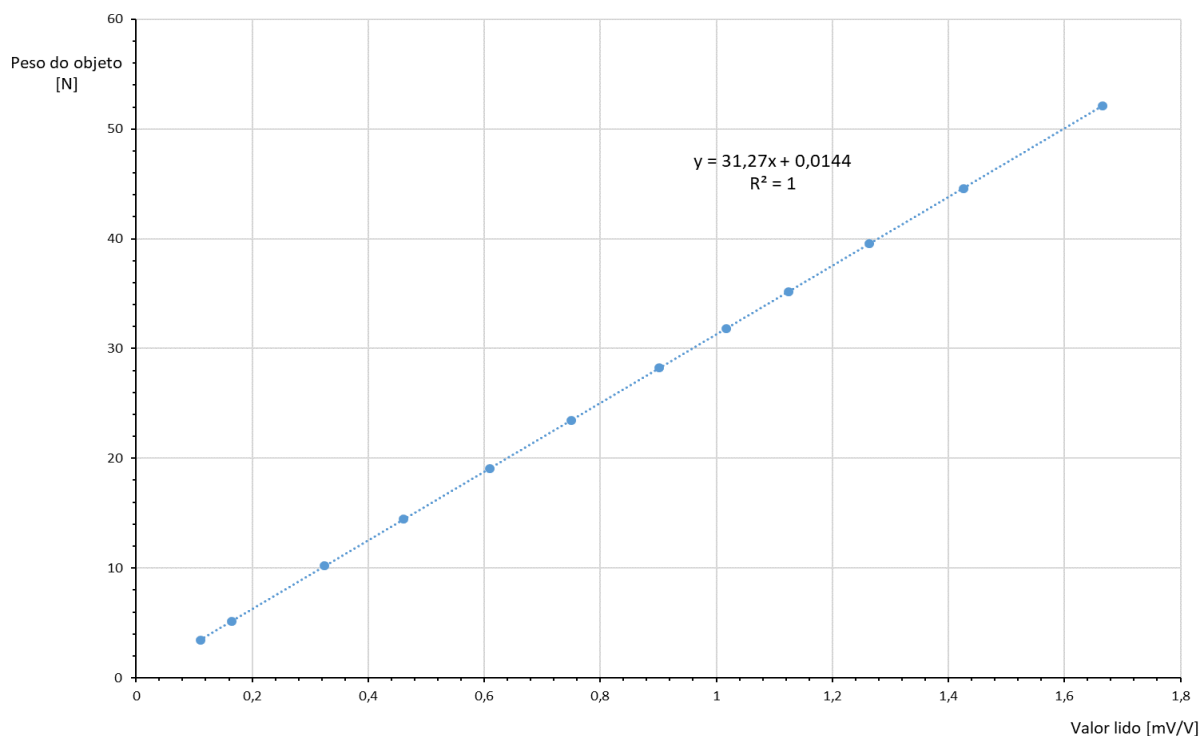


Figura C3 – Gráfico da calibração da célula de carga (estrutura deitada).

O procedimento de aquisição dos valores medidos foi o mesmo do utilizado durante os ensaios experimentais para medir a força de arrasto, sendo a resolução de 0,000001 mV/V).



Figura C4 – Massas conhecidas utilizadas.

ANEXO D: Análise das incertezas de medição

Na realização de trabalho experimental é sempre indispensável a análise das incertezas das medições efetuadas.

Seguindo uma análise geral de incertezas e considerando um caso geral em que um resultado experimental, r , é função de J variáveis X_i , a incerteza absoluta U_r no resultado é dada por:

$$U_r^2 = \left[\left(\frac{\partial r}{\partial X_1} U_{X_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial X_2} U_{X_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial r}{\partial X_J} U_{X_J} \right)^2 \right] \quad (D.1)$$

Onde:

U_{X_i} são as incertezas das variáveis medidas X_i

$\partial r / \partial X_i$ são os coeficientes de sensibilidade absolutos

No caso de resultados experimentais obtidos por uma função da forma:

$$r = k X_1^a X_2^b X_3^c \dots \quad (D.2)$$

Onde:

k é um valor constante

a, b, c, \dots são os valores de expoente (positivos ou negativos) das variáveis X_i

A equação D.1 transforma-se em:

$$\frac{U_r^2}{r^2} = a^2 \left(\frac{U_{X_1}}{X_1} \right)^2 + b^2 \left(\frac{U_{X_2}}{X_2} \right)^2 + c^2 \left(\frac{U_{X_3}}{X_3} \right)^2 + \dots \quad (D.3)$$

Em relação ao trabalho experimental o valor que se tentou obter foi o coeficiente de arrasto que, lembrando, é dado por:

$$C_D = \frac{D}{0,5 \times \rho \times v^2 \times S} \quad (D.4)$$

Que tem a forma referida na equação D.2 e, tendo em conta que $S = \pi d^2 / 4$, a equação D.3 fica:

$$\frac{U_{C_D}^2}{C_D^2} = \left(\frac{U_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{U_\rho}{\rho} \right)^2 + 4 \left(\frac{U_d}{d} \right)^2 + 4 \left(\frac{U_v}{v} \right)^2 \quad (D.5)$$

A incerteza absoluta da medição da força de arrasto (U_D) pode ser dividida entre o valor de incerteza associado ao conjunto célula de carga-DAQ (ver anexo B) e o valor de incerteza que advém da calibração do sistema (anexo C).

Relativamente à incerteza associada ao conjunto célula de carga-DAQ é estimada em 0,01 N, enquanto a incerteza associada ao erro de calibração e da curva de aproximação que advém da mesma foi calculada segundo a referência [15], tendo sido obtido o valor de 0,0258 N.

A incerteza da força de arrasto é, então, dada por:

$$U_D = \sqrt{0,01^2 + 0,0258^2} = 0,0277 \text{ N} \quad (\text{D.6})$$

Já os valores de incerteza da massa volúmica e da velocidade de escoamento são retirados diretamente do sistema de aquisição do túnel de vento e correspondem a:

$$U_v = 0,01 \text{ m/s} \quad (\text{D.7})$$

$$U_\rho = 0,001 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{D.8})$$

Por último, a incerteza do diâmetro dos disco corresponde a meio milímetro, ou seja:

$$U_d = 0,0005 \text{ m} \quad (\text{D.9})$$

Tendo por base estes valores das incertezas e a equação D.5 chegou-se a valores da incerteza absoluta e relativa dos valores de C_D medidos para a velocidade nominal de 9 m/s tanto para os discos (Tabela D1) como para os anemómetros (Tabela D2).

Tabela D1 - Cálculo do valor da incerteza absoluta e incerteza relativa do C_D para os discos com velocidade nominal de escoamento de 9 m/s

BR	d (m)	v (m/s)	ρ (kg/m ³)	D (N)	C_D	U_{C_D}/C_D (%)	U_{C_D}
1%	0,1128	8,693	1,1557	0,496	1,137	5,66	0,064
2%	0,1596	8,688	1,1563	1,078	1,236	2,66	0,033
4%	0,2257	8,676	1,1582	2,309	1,325	1,30	0,017
6%	0,2764	8,668	1,1593	3,775	1,445	0,85	0,012
8%	0,3192	8,524	1,1421	5,260	1,582	0,66	0,010
10%	0,3568	8,464	1,1404	6,970	1,706	0,55	0,009
16%	0,4514	8,351	1,1397	13,135	2,066	0,40	0,008

De notar que há outros fatores de incerteza que não foram considerados por ser difícil avaliar a sua influência nas medições, nomeadamente, a incerteza causada pelas vibrações e a possibilidade do escoamento não ser totalmente simétrico como desejado e assumido. Apesar disso, os valores de incerteza mencionados anteriormente já estão sobrestimados, o que poderá compensar o valor de incerteza final.

Tabela D2 - Cálculo do valor da incerteza absoluta e incerteza relativa do C_D para os anemômetros com velocidade nominal de escoamento de 9 m/s

Anemómetro	S(m²)	v (m/s)	ρ (kg/m³)	D (N)	C_D	U_ C_D / C_D (%)	U_ C_D
NRG livre	0,02211	8,684	1,1556	0,676	0,701	4,14	0,029
NRG preso	0,02211	8,690	1,1547	0,668	0,694	4,19	0,029
Thies livre	0,02463	8,679	1,1623	1,052	0,912	2,71	0,025
Thies preso	0,02463	8,706	1,1572	0,894	0,828	3,16	0,026
Vector livre	0,02961	8,679	1,1534	0,804	0,625	3,48	0,022
Vector preso	0,02961	8,693	1,1533	0,776	0,601	3,60	0,022